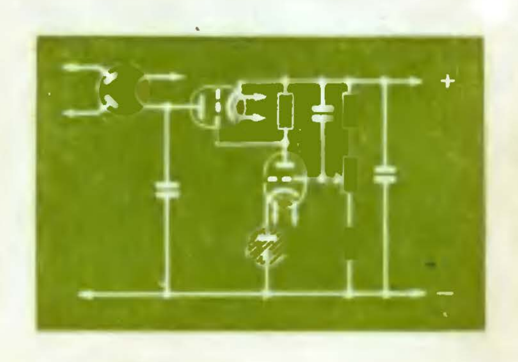
МАССОВАЯ
РАДИО-
БИБЛИОТЕКА

К. Б. МАЗЕЛЬ

# ВЫПРЯМИТЕЛИ И СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ






ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

*Выпуск 111*

К. Б. МАЗЕЛЬ

# ВЫПРЯМИТЕЛИ И СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

*В брошюре описываются основные схемы выпрямителей и электронных стабилизаторов напряжения. Приводятся формулы, дающие возможность произвести расчет выпрямителя и сглаживающего фильтра, а также стабилизатора с лампами тлеющего разряда (стабиловольтами) и электронного стабилизатора напряжения. В заключение приводится пример расчета выпрямителя с фильтром и со стабилизатором напряжения.*

*Брошюра рассчитана на подготовленного радиолюбителя.*

СОДЕРЖАНИЕ



Редактор *А. Ф. Сенченков* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 28/III 1951 г. Подписано в печать 14/VI 1951 г.
Бумага 82×108[1]/[32], бумажн. 1[7]/[8], п. л. 6,15 Уч.-изд. л. 7,1
Т-04831 Тираж 25 000 экз. Заказ 1136.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

# АВТОМАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Развитие техники радиоприема и телевидения, с одной стороны, обеспечивает нам высокое качество воспроизведения принимаемых передач в сочетании с простотой обслуживания приемных устройств, а с другой стороны, вызывает почти неизбежное усложнение схемы, увеличение числа ламп и введение ряда дополнительных устройств.

Если радиолюбитель хочет итти в ногу с развивающейся техникой, он не должен бояться нововведений и некоторых усложнений в схеме своего устройства, тем более, что в результате этого он улучшит качество или упростит обслуживание приемника или телевизора. Не следует, конечно, на первых порах браться за выполнение сложных схем, так как малоподготовленного радиолюбителя может постигнуть неудача и затраченный труд окажется бесполезным. Усложнять свою схему нужно постепенно, сообразуясь с собственным опытом и советуясь с более опытными любителями.

К числу вспомогательных схем, улучшающих качество приемного устройства и главным образом упрощающих управление им, относятся в первую очередь схемы автоматического регулирования.

Наиболее распространенными схемами автоматического регулирования являются:

1) автоматическое регулирование усиления — АРУ (известное также под названием регулирования чувствительности — АРЧ), обеспечивающее малое изменение мощности на выходе приемника при значительных изменениях напряжения сигнала на входе и применяющееся как один из основных способов борьбы с явлением «замирания»;

2) автоматическое регулирование тона АРТ, расширяющее полосу частот, пропускаемых усилителем низкой частоты при сильных сигналах и сужающее эту полосу при слабых сигналах, что снижает влияние помех при приеме слабых сигналов;

3) автоматическое регулирование избирательности АРИ, аналогичное АРТ, но отличающееся тем, что сужение полосы при слабых сигналах происходит не в низкочастотной части приемника, а на высокой или промежуточной частоте;

4) автоматическая «тихая» (или «бесшумная») настройка — АТН, устраняющая шумы и трески при перестройке с одной станции на другую, когда приемник при наличии АРУ развивает свою полную чувствительность;

5) автоматическая подстройка АРП, поддерживающая точную настройку приемника на принимаемую станцию;

6) автоматическое регулирование диапазона громкости сигнала-экспандер, создающее требуемую контрастность между наиболее тихими и громкими звучаниями передачи;

7) автоматическое регулирование напряжений питания — стабилизация напряжения, обеспечивающее (с той или иной степенью точности) постоянство напряжений питания при изменениях напряжения сети и изменениях нагрузки.

В результате применения ряда автоматических регулирований удалось не только значительно упростить управление приемниками, но и обеспечить автоматическое поддержание оптимальных условий приема при непрерывных изменениях сигнала и напряжения питания, чего нельзя достигнуть при наличии только ручных регулировок. Кроме того, авторегулирование в ряде случаев компенсирует изменения, происходящие в приемнике из-за нарушений в режимах его цепей.

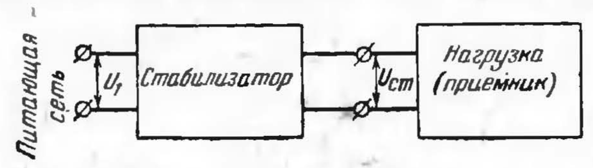
В настоящей брошюре будут рассмотрены схемы, относящиеся только к последнему виду автоматического регулирования, т. е. схемы стабилизаторов напряжения. Читатели, интересующиеся другими схемами авторегулирования, в том числе упомянутыми выше, могут найти подробное описание таких схем в книге П. Н. Куксенко «Автоматические регулировки в радиоприемниках», Москва, Радиоиздат, 1937 г.

## СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Автоматическое поддержание постоянства напряжения питания или стабилизация напряжения применяется в настоящее время в целом ряде устройств — приемных, передающих, телевизионных, измерительных и других. Наличие стабилизованного напряжения в тех или иных устройствах не только желательно, но во многих случаях необходимо. Отсутствие стабильного источника питания может или значительно усложнить схему устройства, или сделать невозможной его нормальную работу.



Использование сухих батарей и аккумуляторов как источников стабильного (устойчивого) напряжения в подавляющем большинстве случаев нерационально из-за большого объема, веса и эксплоатационных неудобств (смена, зарядка) этих источников питания. Желая использовать для питания сеть переменного (или постоянного) тока, мы должны включить между сетью и нагрузкой (например, приемником, телевизором) то или иное стабилизирующее устройство, позволяющее получить напряжение с нужной степенью стабильности (фиг. 1). В питающей




Фиг. 1. Блок-схема включения стабилизатора напряжения.

сети наблюдаются изменения напряжения двух родов: медленные изменения напряжения, происходящие за период времени от нескольких минут до нескольких часов, и быстрые изменения напряжения, происходящие с частотой до нескольких раз в секунду. Медленные изменения напряжения вызываются постепенным увеличением или уменьшением общей нагрузки сети, а быстрые изменения напряжения вызываются пуском и выключением отдельных электрических установок (электродвигателей).

Все эти изменения отрицательно сказываются на качестве радиоприема и, в особенности, на качестве телевизионного изображения. Медленные колебания напряжения вызывают изменения размеров изображения, а также его яркости и контрастности (фокусировки) с течением времени. Изменение частоты гетеродина, влекущее за собой расстройку приемника, и изменение усиления приемника, могущее вызвать появление искажений, также являются следствием медленных изменений напряжения питания. Быстрые изменения напряжения сети вызывают неприятное и утомляющее дрожание и мерцание телевизионного изображения.

Очевидно, что применение необходимого количества ручных регулировок позволит на некоторый период времени

скомпенсировать те изменения, которые вызываются медленными колебаниями напряжения. Такое частичное решение вопроса может быть получено за счет усложнения управления приемником. В то же время нужно иметь в виду, что ручные регулировки не могут устранить последствий быстрых изменений напряжения.

Так как большинство стабилизаторов напряжения практически безинерционно и одинаково хорошо работает как при медленных, так и при быстрых изменениях напряжения, то наиболее правильным решением в данном случае является применение стабилизаторов для питания тех цепей, изменение режима которых влияет на устойчивость и качество приема. К числу напряжений, требующих стабилизации, в частности, относятся: анодное напряжение генераторов разверток, влияющее на размеры изображения; напряжения, питающие цепи регулирования яркости и фокусировки; анодное напряжение гетеродинов, влияющее на генерируемую частоту; экранное напряжение усилителей высокой и низкой частоты, влияющее на усиление, и некоторые другие.

Не ограничиваясь приведенными примерами, могущими встретиться в радиолюбительской практике, следует отметить, что такие устройства, как клистронный ультравысокочастотный генератор и электронный микроскоп, вообще не могут нормально работать без стабилизации питающих напряжений. Стабилизация напряжения питания в настоящее время обязательна также в целом ряде измерительных приборов (в ламповых вольтметрах, осциллоскопах, измерительных генераторах и др.). Большинство стабилизаторов напряжения обладает способностью поддерживать постоянство напряжения не только при изменениях напряжения сети, но и при изменениях тока нагрузки. Последнее свойство часто бывает весьма необходимым, например, при питании усилителя низкой частоты, работающего в классе В, ток потребления которого, как известно, меняется в широких пределах При питании такого усилителя от обычного кенотронного выпрямителя (без стабилизатора) анодное напряжение усилителя будет заметно падать при увеличении тока потребления и увеличиваться при уменьшении тока, что вызовет искажения усиливаемого сигнала.

Кроме стабилизаторов напряжения, в практике встречаются стабилизаторы тока, которые обладают способностью поддерживать неизменный ток нагрузки при изменении напряжения питающей сети и при изменении сопротивления



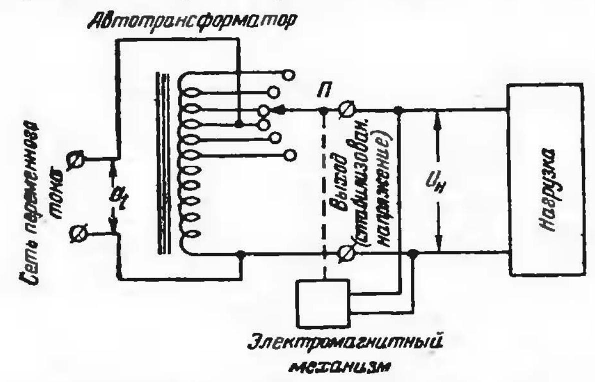
нагрузки. Стабилизаторы тока применяются для питания фокусирующих катушек в электронно-лучевых трубках с магнитным отклонением, для питания нитей ламп, чувствительных к изменениям тока накала, и для других целей. Стабилизаторы тока встречаются реже, чем стабилизаторы напряжения.

## ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Существующие стабилизаторы напряжения можно разбить на четыре группы:

1. Стабилизаторы с движущимися частями. Эти стабилизаторы правильнее называть механическими авторегуляторами.
2. Электромагнитные стабилизаторы.
3. Стабилизаторы, использующие нелинейную зависимость между силой тока и напряжением, которой обладают некоторые элементы схем (лампы накаливания, твердые выпрямители, специальные сопротивления и др.).
4. Стабилизаторы с электронными лампами (электронные стабилизаторы).

Простейшим примером стабилизатора первой группы может служить автотрансформатор, отводы которого авто-




Фиг. 2. Механический регулятор напряжения с автотрансформатором.

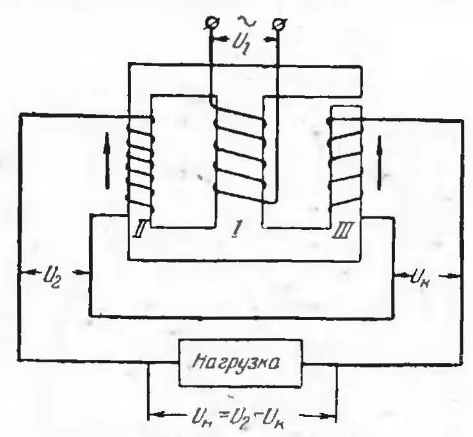
матически переключаются в зависимости от величины выходного напряжения. Выходное напряжение воздействует на электромагнитный механизм, жестко связанный с ползунком *П* (фиг. 2). В случае понижения напряжения сети пол-

зунок будет двигаться вверх, пока напряжение на выходе снова не достигнет нормального значения. Регулировка напряжения происходит не плавно, а небольшими скачками, величина которых зависит от напряжения между отводами автотрансформатора.

Механические авторегуляторы обычно применяются для регулирования переменного и постоянного напряжения в устройствах большой мощности. Они не успевают следовать за быстрыми изменениями напряжения сети, так как в силу своих конструктивных особенностей обладают большой инерционностью. Конструкции механических регуляторов отличаются сравнительной сложностью и громоздкостью; в данной брошюре мы их рассматривать не будем.

Ко второй группе стабилизаторов (электромагнитных) относится большое количество схем, в которых используются свойства насыщенного стального сердечника.

Примером электромагнитного стабилизатора может служить схема, приведенная на фиг. 3. Стержень *III* имеет воз-



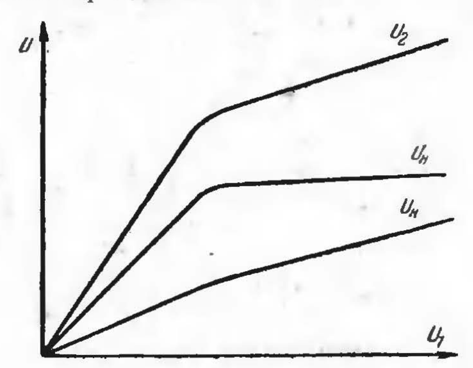

Фиг. 3. Схема электромагнитного стабилизатора напряжения.

душный зазор и, следовательно, не насыщен. Стержень *II* насыщен и несет на себе основную вторичную обмотку, а стержень *III* — компенсирующую обмотку. На стержне *I* расположена первичная обмотка, включаемая в сеть. При увеличении напряжения сети магнитный поток через стержень *II* почти не увеличивается, и все изменение магнитного потока проходит через стержень *III*. Вследствие этого



изменения напряжения сети вызывают незначительные изменения напряжения в обмотке *II* и большие изменения напряжения в компенсирующей обмотке *III*. Напряжение компенсирующей обмотки выбирается таким, чтобы оно выравнивало изменения напряжения обмотки *II*. С этой целью компенсирующая обмотка III включается навстречу обмотке *II* (фиг. 4).

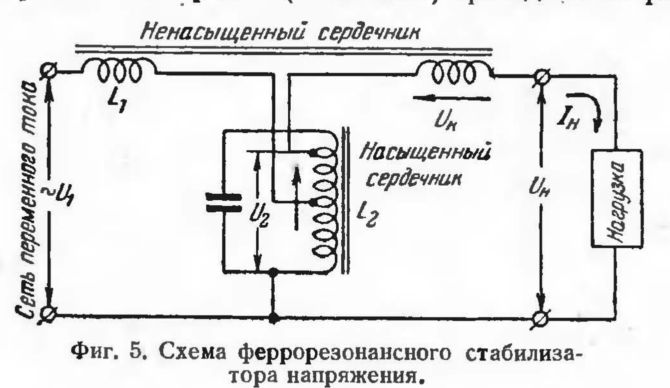
К электромагнитным стабилизаторам относятся также схемы стабилизаторов, известные под названием феррорезо-




Фиг. 4. Зависимость напряжения в электромагнитном стабилизаторе от напряжения питающей сети.

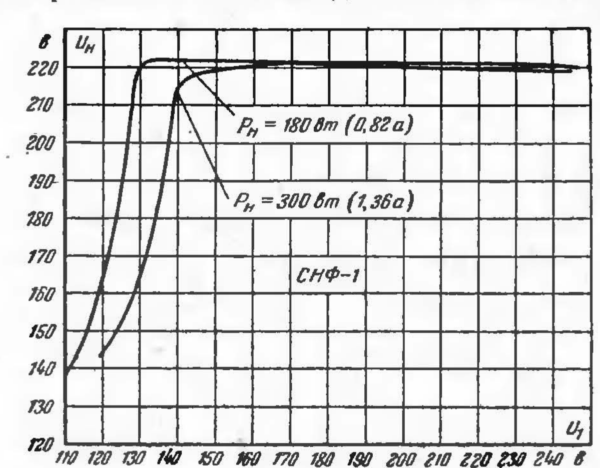
нансных и использующие резонансные явления в цепях, содержащих сталь. Схемы феррорезонансных стабилизаторов содержат обычно конденсатор, который включается последовательно или параллельно с катушкой, расположенной на насыщенном стальном сердечнике. Одна из таких схем показана на фиг. 5. При увеличении напряжения сети резко возрастает ток через дроссель $L_2$ с насыщенным сердечником, так как индуктивное сопротивление такого дросселя уменьшается с ростом напряжения на нем. В результате быстро возрастает падение напряжения на дросселе $L_1$ с ненасыщенным сердечником; почти весь избыток напряжения сети падает на дросселе $L_1$, и напряжение $U_2$ на дросселе $L_2$ остается почти без изменений. В данной схеме дроссель $L_2$ используется как повышающий автотрансформатор. Для улучшения стабилизации на одном сердечнике с дросселем $L_1$ помещается компенсирующая обмотка $U_к$ включаемая навстречу напряжению $U_2$.

Кривая зависимости стабилизованного напряжения от напряжения питающей сети для феррорезонансного стабилизатора по схеме фиг. 5 (типа СНФ) приведена на фиг. 6.




Фиг. 5. Схема феррорезонансного стабилизатора напряжения.

Электромагнитные стабилизаторы применяются только для стабилизации переменного напряжения и изготовляются на самые различные мощности до 1—2 *квт*. Они могут под-



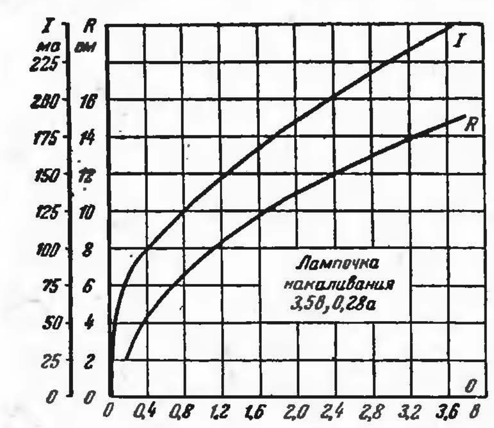

Фиг. 6. Зависимость стабилизованного напряжения от напряжения сети для стабилизатора типа СНФ-1.

держивать выходное напряжение с точностью 0,5—1%, обладают сравнительно высоким к. п. д. (70 — 80%) и практически безинерционны. К их достоинствам следует отнести



также надежность, бесшумность работы и отсутствие движущихся частей.

Серьезным недостатком электромагнитных стабилизаторов является зависимость выходного напряжения от частоты сети: изменение частоты сети на 1—2% вызывает изменение выходного напряжения на 2—3%. К числу недостатков следует также отнести: искажение формы кривой стабилизованного напряжения (что следует учитывать при расчете выпрямителей), изменение стабилизации в зависимости от характера нагрузки (индуктивной или емкостной) и значительное магнитное поле рассеяния, что во многих случаях делает невозможным помещение стабилизаторов



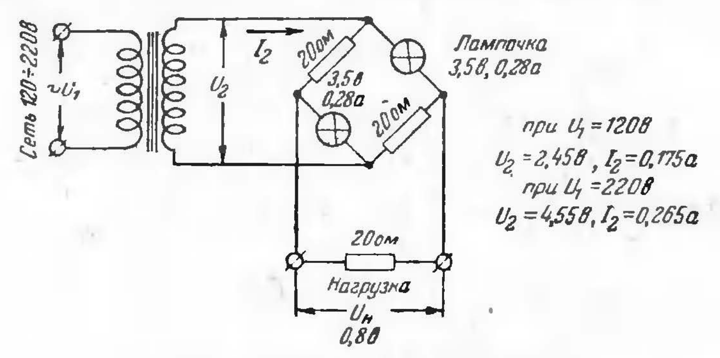

Фиг. 7. Зависимость силы тока и сопротивления лампочки накаливания 3,5 *в*, 0,28 *а* от приложенного напряжения.

в одной конструкции с приемным или усилительным устройством.

С расчетом и конструированием различных схем электромагнитных стабилизаторов можно ознакомиться в специальных книгах (например, С. Я. Лившиц «Феррорезонансные стабилизаторы напряжения», Массовая радиобиблиотека, вып. 91, Госэнергоиздат, 1951 г.); в данной брошюре мы ограничимся сказанным выше.

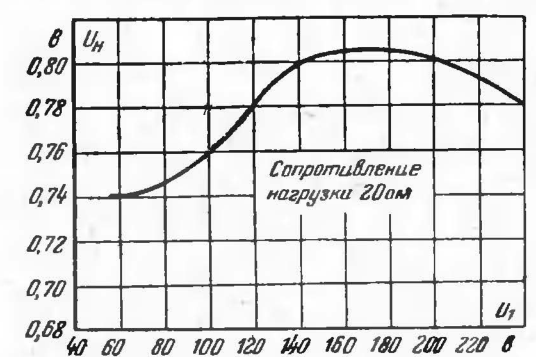
К третьей группе стабилизаторов относится довольно большое количество схем, использующих характерные свойства бареттеров, ламп тлеющего разряда (газовых стабилизаторов), ламп накаливания (с вольфрамовой и угольной

нитью), твердых выпрямителей (купроксных, селеновых), а также специальных тиритовых сопротивлений. Как известно, все эти элементы, называемые нелинейными, не подчиняются закону Ома, так как сопротивление таких элементов зависит от приложенного к ним напряжения (фиг. 7).




Фиг. 8. Схема мостикового стабилизатора.

В дальнейшем мы подробно познакомимся со схемами, в которых применяются бареттеры и газовые стабилизаторы напряжения. Здесь же в качестве примера укажем на мостиковую схему стабилизатора с лампочками от карманного




Фиг. 9. Зависимость стабилизованного напряжения от напряжения сети для схемы мостикового стабилизатора фиг. 8.

фонаря (3,5 *в*, 0,28 *а*) в качестве нелинейных элементов (фиг. 8). Зависимость стабилизованного напряжения от напряжения сети для схемы фиг. 8 приведена на фиг. 9.



Такой или аналогичный стабилизатор может быть использован как эталон переменного напряжения, необходимый, например, для градуирования измерительного осциллоскопа или для других целей.

Схемы мостиковых стабилизаторов с различными нелинейными элементами применяются для стабилизации как переменного, так и постоянного напряжения. Эти схемы используются обычно в маломощных измерительных устройствах, так как они обладают очень низким к. п. д. (5—10%).

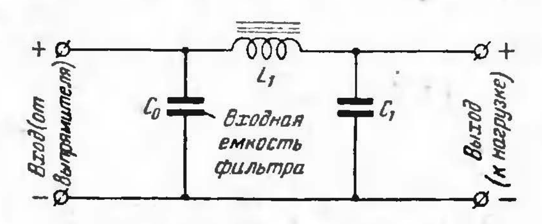
Схемы, в которых применяются бареттеры и лампы накаливания, обладают инерционностью и не сразу реагируют на внезапное изменение напряжения сети. Это объясняется тем, что нить бареттера или лампы требует некоторого времени для своего прогрева.

К четвертой группе стабилизаторов (электронных) относятся широко распространенные схемы, в которых процесс регулирования осуществляется с помощью электронных ламп. Стабилизаторы этой группы могут обеспечить наиболее высокие степени стабильности по сравнению со стабилизаторами других групп. Электронные стабилизаторы устойчивы в работе, безинерционны, малочувствительны к смене отдельных элементов схемы (ламп, сопротивлений и т. д.). Большинство электронных стабилизаторов напряжения обладает весьма малым внутренним сопротивлением (единицы — десятки *ом*) и поэтому хорошо поддерживают выходное напряжение при изменениях тока нагрузки.

Электронные стабилизаторы предназначены для стабилизации постоянного напряжения или тока, источником которых служит обычно выпрямитель или сеть постоянного тока. Электронные стабилизаторы напряжения широко применяются в различных радиотехнических устройствах. Радиолюбителю, желающему устранить в своем приемнике ненормальности, вызываемые колебаниями напряжения сети, нетрудно будет рассчитать и собрать схему электронного стабилизатора напряжения, пользуясь настоящей брошюрой. В дальнейшем мы подробно разберем принцип действия и расчет наиболее употребительных схем электронных стабилизаторов напряжения, а также рассмотрим некоторые схемы электронных стабилизаторов тока. В связи с тем, что нормальная работа электронного стабилизатора в сильной степени зависит от правильного выбора питающего стабилизатор выпрямителя, мы вначале остановимся на способе расчета основных выпрямительных схем.

## СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

В радиолюбительской практике чаще всего встречаются кенотронные и реже купроксные или селеновые выпрямители. Сглаживающий фильтр этих выпрямителей обычно начинается с емкости (фиг. 10); в таких случаях говорят, что выпрямитель работает на емкость. Нужно иметь в виду, что




Фиг. 10. Схема сглаживающего фильтра выпрямителя, работающего на емкость.

расчет выпрямителей, работающих с фильтром без входной емкости или вообще без фильтра, существенно отличается от расчета выпрямителей, работающих на емкость. Наличие входной емкости (при прочих равных условиях) повышает выпрямленное напряжение и значительно уменьшает величину пульсации. Так как от величины входной емкости фильтра зависит режим работы выпрямителя, то в дальнейшем в расчет выпрямителя, работающего на емкость, будет входить расчет необходимой входной емкости.

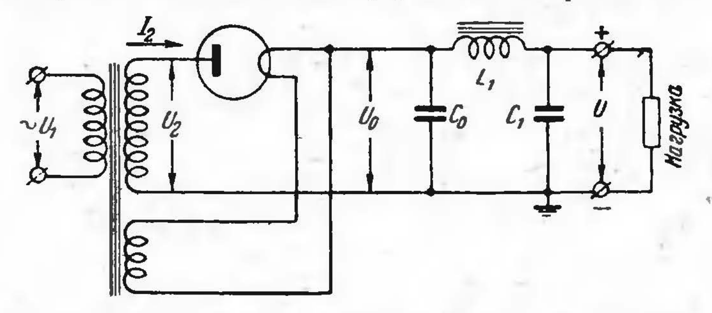
Рассмотрим основные, наиболее употребительные схемы выпрямителей, работающих на емкость, используемые преимущественно для питания маломощных устройств.

### ОДНОПОЛУПЕРИОДНАЯ СХЕМА

Однополупериодная или однофазная схема (фиг. 11) является наиболее простой выпрямительной схемой. Она используется для питания маломощных приемников и других устройств, где требуется простота схемы и допускается несколько повышенная пульсация выпрямленного напряжения. Свое название схема получила из-за того, что в ней используется для выпрямления только один (положительный) полупериод переменного напряжения вторичной обмотки. Частота пульсации выпрямленного напряжения совпадает



в этой схеме с частотой сети. В однополупериодной схеме чаще всего применяются кенотроны, но в некоторых случаях используются селеновые или купроксные выпрямители.

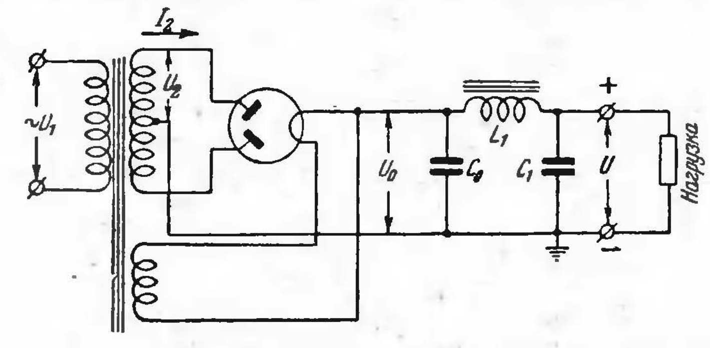



Фиг. 11. Схема однополупериодного выпрямителя с фильтром.

### ДВУХПОЛУПЕРИОДНАЯ СХЕМА

Двухполупериодная или двухфазная схема (фиг. 12) является наиболее распространенной выпрямительной схемой для питания маломощных устройств.

Обе половины вторичной обмотки трансформатора работают в этой схеме поочередно. Таким образом, здесь используются оба полупериода переменного напряжения. Так как при этом частота пульсации равна удвоенной частоте сети, то величина пульсации выпрямленного напряжения в двухполупериодной схеме будет меньше, чем в однополупериодной, при одном и том же сглаживающем фильтре.

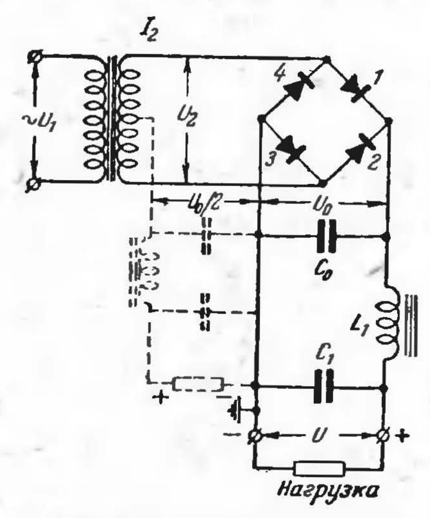



Фиг. 12. Схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром.

В двухполупериодной схеме удобнее всего применять двуханодные кенотроны. Недостатком схемы является большое напряжение вторичной обмотки, равное обычно почти двойному выпрямленному напряжению.

## МОСТИКОВАЯ СХЕМА

Мостиковая схема выпрямления особенно удобна, когда в ней применяются селеновые или купроксные выпрямители. На фиг. 13 показана мостиковая схема с селеновыми или купроксными выпрямителями, изображенными в виде стрелок, направление которых указывает направление прохождения тока. В случае замены в схеме (фиг. 13) селеновых выпрямителей кенотронами потребовалось бы иметь три изолированные накальные обмотки: одну — для кенотронов *1* и *2*, вторую — для кенотрона *3* и третью — для кенотрона *4*. Поэтому мостиковую схему можно рекомендовать главным образом для селеновых или купроксных выпрямителей, не имеющих, как известно, накальных цепей.




Фиг. 13. Мостиковая схема выпрямителя с фильтром.

Работа мостиковой схемы происходит следующим образом. Предположим, что верхний конец вторичной обмотки трансформатора обладает в данный момент положительным потенциалом по отношению к нижнему концу. Тогда ток от верхнего конца вторичной обмотки пройдет через селеновый выпрямитель плеча *1*, через нагрузку, через плечо *3* и вернется к нижнему концу вторичной обмотки трансформатора. В следующий полупериод переменного напряжения ток пойдет от нижнего конца вторичной обмотки через плечо *2*, через нагрузку, через плечо *4* и вернется к верхнему концу обмотки.

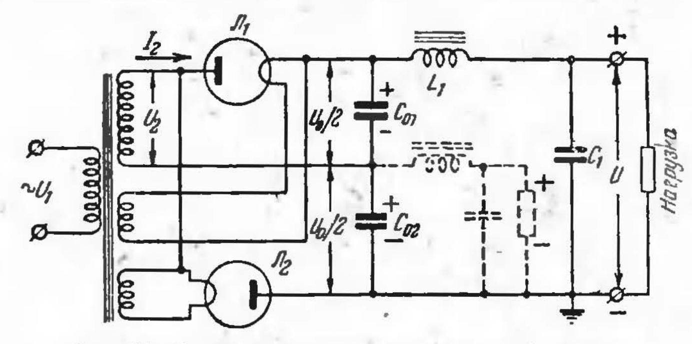


Таким образом, в мостиковой схеме используются оба полупериода переменного напряжения, и частота пульсации поэтому равна удвоенной частоте питающей сети. Преимуществом этой схемы по сравнению с двухполупериодной является снижение почти вдвое напряжения вторичной обмотки трансформатора при одинаковых выпрямленных напряжениях. Кроме того, размеры трансформатора для мостиковой схемы будут меньше, чем для двухполупериодной, при тех же выпрямленных токах и напряжениях. В мостиковой схеме нельзя заземлять выводы выпрямленного напряжения, если вторичная обмотка трансформатора имеет соединение с землей.

Если от вторичной обмотки трансформатора вывести среднюю точку, то одновременно с выпрямленным напряжением $U_0$ можно получить напряжение $\frac{U_0}{2}$. Такая схема показана пунктиром на фиг. 13. Напряжение $\frac{U_0}{2}$ создается двухполупериодной схемой, использующей селеновые выпрямители *3* и *4* мостиковой схемы.

## СХЕМА УДВОЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

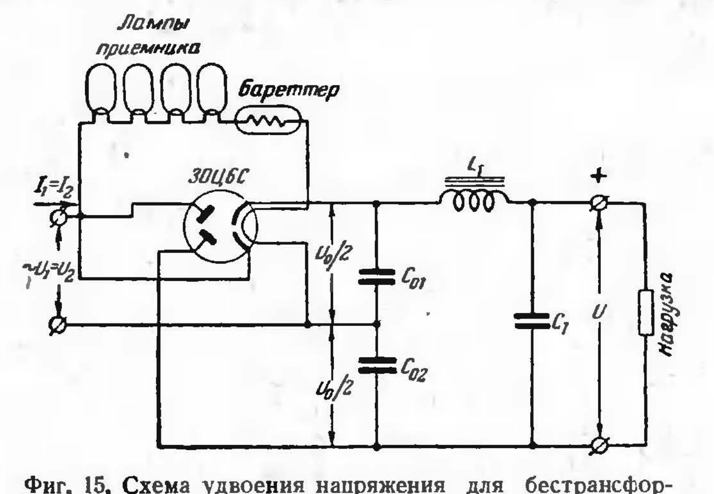
Схема удвоения напряжения (фиг. 14) часто применяется в тех случаях, когда имеющееся переменное напряжение недостаточно для получения требуемого выпрямленного напряжения. Схему удвоения можно представить как две однополупериодные схемы, соединенные последовательно. Каждая однополупериодная схема создает на своей входной




Фиг. 14. Схема удвоения напряжения с фильтром.

емкости $C_0$ напряжение $\frac{U_0}{2}$. Когда верхний конец вторичной обмотки трансформатора становится положительным по отношению к нижнему концу, то заряжается конденсатор $C_{01}$; когда положительным становится нижний конец обмотки, то заряжается конденсатор $C_{02}$. Конденсаторы $C_{01}$ и $C_{02}$ соединены между собой так, что их напряжения складываются и на нагрузке получается удвоенное выпрямленное напряжение по сравнению с однополупериодной схемой.

В схеме удвоения также используются оба полупериода переменного напряжения, вследствие чего частота пульсаций равна удвоенной частоте сети. В ней применяются как кенотроны, так и селеновые или купроксные выпрямители. При




Фиг. 15. Схема удвоения напряжения для бестрансформаторного приемника.

использовании в схеме кенотронов следует иметь в виду, что для питания накалов необходимо иметь две отдельные изолированные обмотки. Если вторичная обмотка трансформатора соединена с землей, то в таком случае выводы выпрямленного напряжения заземлять нельзя. В случае необходимости соединение с землей можно сделать только через небольшую емкость 500—1 000 *мкмкф*.

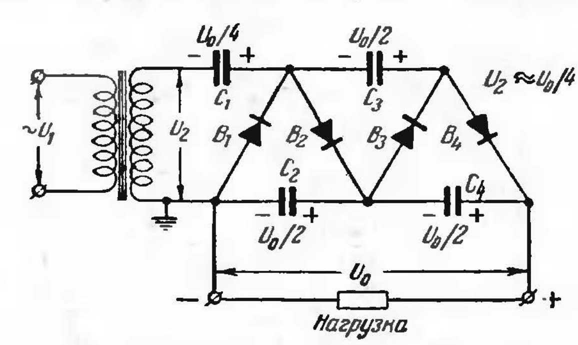
Одновременно с напряжением $U_0$ схема удвоения позволяет получить напряжение $\frac{U_0}{2}$, как это показано пунктиром на фиг. 14.



Схема удвоения напряжения часто применяется для питания бестрансформаторных приемников, в которых напряжение сети заменяет напряжение вторичной обмотки силового трансформатора, а нити накала кенотронов и ламп соединяются последовательно и питаются непосредственно от той же сети через бареттер (фиг. 15). Для бестрансформаторных приемников применяются специальные кенотроны, имеющие повышенное напряжение накала и подогревные катоды, изолированные от нити накала (например, кенотроны 30Ц1М и 30Ц6С).

## СХЕМЫ УМНОЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Если выпрямленное напряжение, полученное с помощью схемы удвоения, недостаточно, а увеличить переменное напряжение вторичной обмотки трансформатора по тем или иным причинам нельзя, то можно воспользоваться схемами умножения напряжения. Схемы умножения дают возможность получить утроенное, учетверенное и т. д. напряжение по сравнению с однополупериодной схемой при одном и том же напряжении вторичной обмотки трансформатора. В схемах умножения чаще всего применяются селеновые или купроксные выпрямители.




Фиг. 16. Схема учетверения напряжения.

Схемы умножения применяются главным образом для питания анодов электронно-лучевых трубок (осциллоскопических, телевизионных и др.).

На фиг. 16 приведена схема учетверения напряжения, в которой имеются четыре выпрямителя (например, селеновых)

и четыре конденсатора. Работу схемы можно объяснить следующим образом. Предположим, что в данный момент нижний конец вторичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал по отношению к верхнему концу. Тогда конденсатор $C_1$ зарядится через выпрямитель $B_1$ до напряжения $\frac{U_0}{4}$. В следующий полупериод конденсатор $C_2$ под воздействием суммы напряжений на вторичной обмотке $(U_2)$ и на емкости $C_1$ $\left(\frac{U_0}{4}\right)$ зарядится через выпрямитель $B_2$ до напряжения $\frac{U_0}{2}$. Еще через один полупериод конденсатор $C_3$ зарядится через выпрямитель $B_3$ до напряжения $\frac{U_0}{2}$, которое представляет собой алгебраическую сумму напряжений на вторичной обмотке $(U_2)$, на емкости $C_2$ $\left(\frac{U_0}{2}\right)$ и на емкости $C_1$ $\left(\frac{U_0}{4}\right)$. В данном случае напряжение на емкости $C_1$ направлено противоположно напряжениям на вторичной обмотке и на емкости $C_2$. За четвертый полупериод переменного напряжения конденсатор $C_4$ зарядится через выпрямитель $B_4$ также до напряжения $\frac{U_0}{2}$. При этом напряжение на емкости $C_2$ будет направлено противоположно сумме напряжений на вторичной обмотке и на емкостях $C_1$ и $C_3$. Напряжение на нагрузке представляет собой сумму напряжений на конденсаторах $C_2$ и $C_4$. Нетрудно видеть, что путем добавления или исключения одного или нескольких каскадов умножения (один каскад состоит из выпрямителя и конденсатора) можно изменять кратность умножения напряжения. Например, для получения утроения напряжения следует оставить в схеме фиг. 16 три выпрямителя и три конденсатора, а для получения учетверения напряжения следует добавить два выпрямителя и два конденсатора.

В качестве вторичной обмотки трансформатора для схемы умножения напряжения можно использовать половину вторичной обмотки имеющегося в схеме силового трансформатора с заземленной средней точкой.

В случае применения в схемах умножения кенотронов требуется питать накал каждого из них от отдельной обмотки. Обмотки накала должны быть надежно изолированы друг от друга и от сердечника трансформатора.



## ТИПЫ И ПАРАМЕТРЫ КЕНОТРОНОВ И ТВЕРДЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Как кенотроны, так и твердые выпрямители (селеновые и купроксные) характеризуются своими параметрами, которые необходимо знать при расчете выпрямительных схем. К числу таких параметров относятся максимально допустимая амплитуда обратного напряжения, максимально допустимый импульс выпрямленного тока и внутреннее сопротивление.

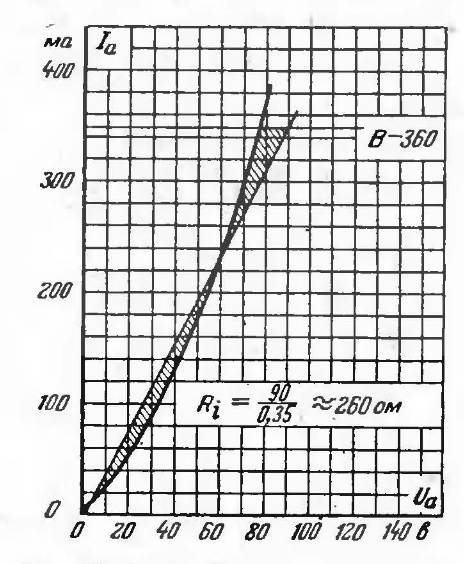
Значение этих параметров следует пояснить.

Обратным напряжением называется напряжение, которое оказывается приложенным между анодом и катодом кенотрона (или твердого выпрямителя) в тот момент, когда он не пропускает тока, т. е. когда анод имеет отрицательный потенциал относительно катода. Повышение обратного напряжения выше допустимого ведет к пробою между анодом и катодом кенотрона или твердого выпрямителя и, следовательно, к выходу выпрямителя из строя. Величина обратного напряжения зависит от схемы выпрямления. Например, в однополупериодной схеме (фиг. 11) обратное напряжение на кенотроне появляется, когда верхний конец вторичной обмотки трансформатора становится отрицательным по отношению к нижнему концу обмотки. Наибольшее обратное напряжение на кенотроне представляет собой сумму амплитудного значения напряжения вторичной обмотки $U_2\sqrt{2}$ и выпрямленного напряжения на входной емкости фильтра $C_0$ при отключенной нагрузке $U_{0x\cdot x}$ (при холостом ходе выпрямителя). Так как при холостом ходе конденсатор $C_0$ заряжается до амплитуды напряжения вторичной обмотки, то наибольшее обратное напряжение в однополупериодной схеме составляет

$$U_{обр} = 2U_2\sqrt{2}.$$

В выпрямительных схемах, работающих на емкость, импульс тока через кенотрон (или селеновый выпрямитель) значительно превышает значение выпрямленного тока. Поэтому при расчете выпрямителя всегда следует проверить, не превышает ли импульс тока допустимого значения для выбранного кенотрона (допустимый импульс тока указывается в паспорте кенотрона). Работа при импульсе тока выше до-

пустимого приводит к быстрому разрушению катода кенотрона и выходу его из строя. Для твердых выпрямителей (селеновых и купроксных) величина допустимого импульса тока обычно в 8—10 раз больше максимального значения выпрямленного тока, допустимого для данного выпрямителя.

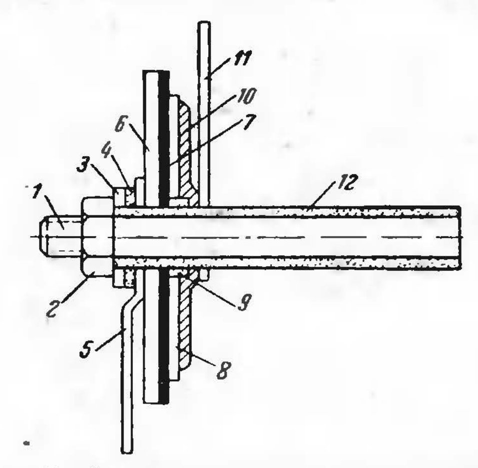



Фиг. 17. Определение внутреннего сопротивления кенотрона В-360 из его вольтамперной характеристики. Выпрямленный ток 50 *ма.*

Величину внутреннего сопротивления кенотрона или селенового выпрямителя можно определить с помощью их статических вольтамперных характеристик, представляющих собой зависимость силы анодного тока от приложенного анодного напряжения. Для определения внутреннего сопротивления на графике вольтамперной характеристики (фиг. 17) необходимо провести горизонтальную линию на уровне тока, в 6—8 раз большего, чем заданное значение выпрямленного тока, через кенотрон или селеновый выпрямитель. Затем из начала координат следует провести прямую линию до пересечения с горизонтальной линией так, чтобы заштрихованные площади оказались приблизительно равными. Прямая



линия, проведенная из начала координат, представляет идеализированную вольтамперную характеристику. Внутреннее сопротивление определяется как отношение напряжения к соответствующему току в любой точке этой прямой. На фиг. 17 приведен пример определения внутреннего сопро-




Фиг. 18. Основные детали селенового выпрямительного элемента.

*1* — монтажный болт (сталь); *2* — гайка (сталь); *3* — шайба (сталь); *4* — шайба изоляционная (гетинакс); *5* — шина контактная от нижнего электрода (латунь); *6* — стальная никелированная или алюминиевая шайба (нижний электрод — анод); *7* — слой селена; *8* — легкоплавкий металл (верхний электрод—катод); *9* — изолирующая шайба; *10* — пружинящая шайба (латунь); *11* — шина контактная от верхнего электрода (латунь); *12* — изолирующая втулка.

тивления кенотрона В-360, через который течет выпрямленный ток 50 *ма.*

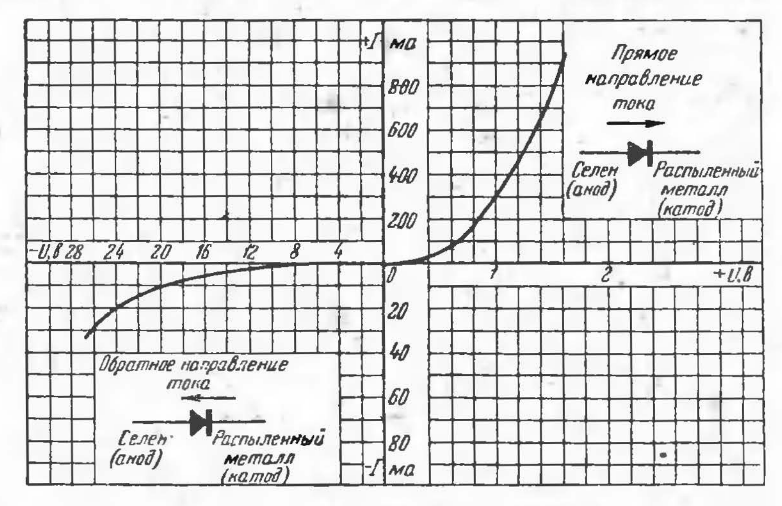
Кенотроны являются наиболее удобными и наиболее распространенными выпрямительными лампами, применяемыми для питания устройств небольшой мощности.

В табл. 1 приводятся основные параметры некоторых употребительных кенотронов.

Напомним устройство селенового выпрямительного элемента. На железную или алюминиевую пластину наносится слой селена. На селен распылением наносится слой легкоплавкого металла, к которому для создания контакта прижимается пружинная шайба (фиг. 18). Процесс выпрямления происходит на границе между селеном и распыленным

металлом. Когда селен (анод) положителен по отношению к металлу (катоду), то выпрямительный элемент обладает малым сопротивлением; при перемене полярности его сопротивление резко увеличивается и выпрямитель можно считать практически непроводящим. Зависимость тока в обоих направлениях от приложенного напряжения (вольтамперная характеристика) для 50 *мм* диска приведена на фиг. 19.

Селеновые выпрямители изготовляются в виде столбиков, собираемых из пластин круглой или квадратной формы. Пластины средних и больших размеров собираются на изо-



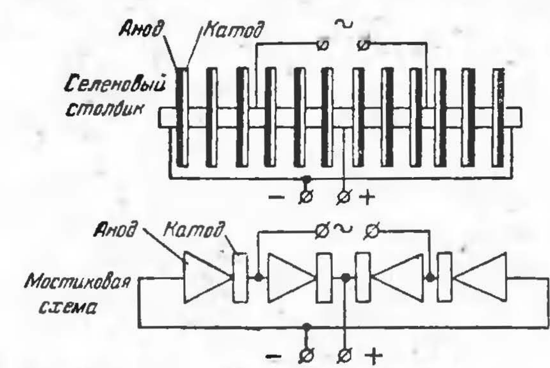

Фиг. 19. Статическая вольтамперная характеристика 50-*мм* селенового диска.

лированный болт, проходящий через отверстия в их центре, и отделяются друг от друга металлическими втулками. Пластины самых малых размеров изготовляются обычно в виде дисков (диаметром до 10 *мм*) и собираются в трубочках, сделанных из изоляционного материала, например из гетинакса. Схема соединения пластин в столбике зависит от схемы выпрямителя, а необходимое число пластин определяется из расчета выпрямителя. На фиг. 20 схематически показан способ сборки селеновых пластин для мостиковой схемы, имеющей по три пластины в плече. Купроксные выпрямители по своей конструкции очень похожи на селеновые. Процесс выпрямления в купроксных выпрямителях происходит



на границе между медной пластинкой (катодом) и покрывающим ее слоем закиси меди (анодом).

В настоящее время селеновые выпрямители получили широкое распространение и почти целиком вытеснили купроксные, имеющие более низкие качественные показатели. По сравнению с купроксными селеновые выпрямители могут работать при более высоких температурах (до 60—70° вместо 35—40°), обладают более высоким к. п. д. (до 85%) и самое главное допускают большую величину об-




Фиг. 20. Схема сборки селенового столбика для мостиковой схемы.

ратного напряжения на один выпрямительный элемент (до 25 амплитудных вольт вместо 14 амплитудных вольт). Последнее обстоятельство позволяет почти вдвое уменьшить число последовательно включенных пластин в селеновом выпрямителе по сравнению с купроксным.

Селеновые выпрямители выгодно применять для получения малых выпрямленных напряжений при больших токах (мостиковая схема) и для получения сравнительно высоких напряжений при малых токах (схемы умножения напряжения).

В табл. 2 приводятся данные селеновых пластин (дисков), изготовляемых промышленностью.

Максимально допустимые выпрямленные токи в табл. 2 подсчитаны, исходя из плотности тока около 25 *ма* на 1 *см*² рабочей поверхности диска. Для подсчета рабочей поверхности следует иметь в виду, что в процессе выпрямления не участвует часть поверхности диска около центрального от-

## Основные параметры некоторых кенотронов

Таблица 1

| Обозначение лампы | Аналогичная лампа старого типа | Количество анодов | Напряжение накала, *в* | Ток накала, *а* | Максимально допустимый выпрямленный ток, *ма* | Максимально допустимая амплитуда обратного напряжения, *в* | Максимально допустимый импульс тока, *ма* | Среднее внутреннее сопротивление $R_i$ (на 1 анод), *ом* | Ориентировочная величина максимального выпрямленного напряжения, *в* | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5U4G | — | 2 | 5 | 3 | 112×2 | 1 550 | 675×2 | 200 | 520 | |
| 5Ц4С | 5Ц4; ВО-255 | 2 | 5 | 2 | 62×2 | 1 350 | 375×2 | 150 | 450 | |
| 6Х5С | — | 2 | 6,3 | 0,6 | 35×2 | 1 250 | 210×2 | 350 | 420 | |
| 30Ц1М | — | 1 | 30 | 0,3 | 90 | 500 | 500 | 150 | 170 | |
| 30Ц6С | — | 2 | 30 | 0,3 | 45×2 | 700 | 250×2 | 230 | 230 | Кенотрон имеет раздельные катоды |
| ВО-188 | 2В-400; ВО-116 | 2 | 4 | 2 | 77×2 (65×2) | 1 300 (1 200) | 600×2 (400×2) | 150 (320) | 430 (400) | В скобках указаны отличающиеся параметры кенотронов 2В-400 и ВО-116 |
| ВО-220 | ВО-125 | 2 | 4 | 0,7 | 25×2 (17×2) | 900 (750) | 150×2 | 400 (500) | 300 (250) | В скобках указаны отличающиеся параметры кенотрона ВО-125 |
| ВО-239 | — | 1 | 4 | 2 | 180 | 1 800 | 1 200 | 100 | 600 | |
| ВО-230 | В-360 | 1 | 4 | 0,7 | 50 | 900 (800) | 360 | 200 (260) | 300 (270) | В скобках указаны отличающиеся параметры кенотрона В-360 |
| 1Ц1 | — | 1 | 0,7 | 0,185 | 1 | 10 000 | 10 | 6 000 | 3 300 | |
| 2Х2/879 | 2Х2 В-879 | 1 | 2,5 | 1,75 | 7,5 | 12 500 (7 500) | 100 | 5 000 | 4 200 (2 500) | В скобках указаны отличающиеся параметры кенотрона В-879 |
| 6Х6М | 6Х6 | 2 | 6,3 | 0,3 | 8×2 | 420 | 48×2 | 500 | 150 | Кенотрон имеет раздельные катоды |

## Электрические параметры селеновых дисков

Таблица 2

| Наружный диаметр селеновых дисков, *мм* | 5 | 6,5 | 7,2 | 10 | 18 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 50 | 67 | 80 | 84 | 100 | 112 | 130 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Максимально допустимый выпрямленный ток, *ма* | 2 | 3,5 | 4,5 | 10 | 25 | 35 | 75 | 125 | 140 | 275 | 330 | 670 | 1 000 | 1 150 | 1 700 | 2 200 | 3 000 |
| Внутреннее сопротивление 1 диска, *ом* | 450 | 250 | 200 | 80 | 35 | 25 | 10 | 6 | 5 | 2,5 | 2 | 0,9 | 0,55 | 0,47 | 0,3 | 0,23 | 0,17 |

Примечания: 1. Максимально допустимая амплитуда обратного напряжения 25 *в* на 1 диск.

2. Внутреннее сопротивление диска, приведённое в таблице ($r_{i\,табл}$), соответствует максимально допустимому выпрямленному току для данного диска ($I_{0\,доп}$). Внутреннее сопротивление диска ($r_i$), когда выпрямленный ток ($I_0$) меньше максимального, можно определить из приближенной формулы

$$r_i = r_{i\,табл}\sqrt{\frac{I_{0\,доп}}{I_0}}.$$

3. При эксплоатации селеновых выпрямителей при окружающей температуре 60—70° рекомендуется снижать указанные в таблице значения выпрямленного тока и обратного напряжения на 40—50%.

4. Сопротиаление селенового столбика, составленного из $N$ последовательно включенных дисков, равно $Nr_i$

верстия и поверхность наружного ободка, обычно не покрываемая селеном.

Величина внутреннего сопротивления селенового диска зависит от силы протекающего через него тока. В табл. 2 указаны внутренние сопротивления дисков для соответствующих максимально допустимых значений выпрямленных токов. В случае, если заданный выпрямленный ток меньше максимально допустимого тока для диска данного диаметра, то сопротивление селенового диска будет больше указанного в таблице. Это сопротивление можно найти из приближенной формулы

$$r_i = r_{i\,табл}\sqrt{\frac{I_{0\,доп}}{I_0}}, \qquad (1)$$

где $r_{i\,табл}$ — внутреннее сопротивление диска, указанное в табл. 2;

$I_{0\,доп}$ — максимально допустимое значение выпрямленного тока для диска данного диаметра;

$I_0$ — заданное значение выпрямленного тока.

**Пример 1.** Найти внутреннее сопротивление 50-*мм* селенового диска, если выпрямленный ток через него составляет 160 *ма*. Из табл. 2 находим:

$$r_{i\,табл} = 2\ ом,$$

$$I_{0\,доп} = 330\ ма.$$

Подставляя эти значения в формулу (1), получим:

$$r_i = 2\sqrt{\frac{330}{160}} = 2{,}9\ ом.$$

## РАСЧЕТ КЕНОТРОННЫХ И СЕЛЕНОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

В данной главе мы познакомимся с методом расчета выпрямителей, работающих на емкость. Этот метод применим как к кенотронным, так и к селеновым выпрямителям. Предлагаемый метод расчета очень несложен и в то же время



обеспечивает точность, вполне достаточную для практических целей [1].

Электрический расчет выпрямителя сводится: к выбору схемы выпрямителя и кенотрона (или селенового выпрямителя), к определению напряжения вторичной обмотки ($U_2$) и токов вторичной и первичной обмоток трансформатора ($I_2$ и $I_1$) и к выбору входной емкости фильтра ($C_0$).

Все формулы, приводимые в этой и последующих главах, выведены в предположении, что частота питающей сети $f = 50$ *гц*.

### ВЫБОР СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Схема выпрямителя выбирается в зависимости от мощности, которую требуется получить от выпрямителя, от величины допустимой пульсации выпрямленного напряжения, от заданного значения выпрямленного напряжения, а в некоторых случаях — от наличия того или иного кенотрона или селенового выпрямителя.

Однополупериодную схему (фиг. 11) можно рекомендовать при выпрямленной мощности не более 10—15 *вт* и в тех случаях, когда можно допустить повышенную пульсацию выпрямленного напряжения.

При выпрямленной мощности более 10—15 *вт* обычно применяют двухполупериодную схему (фиг. 12); двухполупериодная схема, кроме того, позволяет уменьшить пульсацию выпрямленного напряжения по сравнению с однополупериодной схемой, не увеличивая емкости и индуктивности сглаживающего фильтра.

Мостиковая схема (фиг. 13) обладает положительными качествами двухполупериодной схемы, но применяется обычно только с селеновыми выпрямителями.

Схема удвоения (фиг. 14) чаще всего применяется в бестрансформаторных выпрямителях (фиг. 15) или в тех случаях, когда напряжение вторичной обмотки трансформатора недостаточно для получения необходимого выпрямленного напряжения.

Схемы умножения напряжения (фиг. 16) применяются для питания электронно-лучевых трубок и в тех случаях, когда требуемый выпрямленный ток составляет не более 3—

---

[1] В основу излагаемого ниже упрощенного метода расчета выпрямителей, работающих на емкость, положен метод расчета, приведенный в книге Б. П. Терентьева, Электропитание радиоустройств, Связьиздат, 1948 г.

5 *ма*; в этих схемах обычно используются селеновые выпрямители.

Иногда наличие того или иного кенотрона или селенового выпрямителя определяет выбор схемы выпрямителя. Например, если имеющийся кенотрон обладает малой величиной допустимого обратного напряжения, то может оказаться, что его нельзя будет применить в однополупериодной или двухполупериодной схеме, но он сумеет дать требуемое выпрямленное напряжение, работая в схеме удвоения.

## ВЫБОР КЕНОТРОНА И СЕЛЕНОВОГО СТОЛБИКА

Выбранный кенотрон или селеновый столбик должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Максимально допустимый выпрямленный ток должен быть не меньше, чем заданный выпрямленный ток.
2. Максимально допустимое обратное напряжение должно быть не меньше, чем максимальное обратное напряжение $U_{обр}$, развиваемое в выбранной схеме.
3. Максимально допустимый импульс выпрямленного тока должен быть не меньше, чем максимальный импульс тока $I_{макс}$, возникающий в выбранной схеме.

Зная эти три величины (отнесенные к одному плечу схемы выпрямителя), можно из табл. 1 и 2 выбрать соответствующий кенотрон или селеновый столбик.

В табл. 3 приведены значения выпрямленного тока $U_{обр}$ и $I_{макс}$, приходящиеся на одно плечо в зависимости от схемы выпрямителя, от выпрямленного напряжения $U_0$ и от полного выпрямленного тока $I_0$. Очевидно, что в каждое плечо схемы выпрямителя может быть включен либо кенотрон, либо селеновый столбик.

Приведем примеры выбора кенотрона и селенового столбика.

**Пример 2.** Необходимо выбрать кенотрон для двухполупериодной схемы выпрямителя (фиг. 12), дающей на выходе напряжение $U_0 = 300$ *в* при токе $I_0 = 100$ *ма*.

По формулам и данным табл. 1 и 3 находим:

1. Выпрямленный ток в одном плече составляет:

$$\frac{I_0}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ ма}.$$

2. Обратное напряжение равно:

$$U_{обр} = 3U_0 = 3 \cdot 300 = 900 \text{ в}.$$



Таблица 3

**Формулы для расчета выпрямителей**

| Схема выпрямителя | Число плеч в схеме | Выпрямленный ток в плече | Обратное напряжение на плече $U_{обр}$ | Максимальный импульс тока в плече $I_{макс}$ | Значение коэффициента $k$ | Сопротивление фазы выпрямителя $R_ф$ | Значение коэффициента $m$ | Ток вторичной обмотки трансформатора $I_2$ | Ток первичной обмотки трансформатора $I_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Однополупериодная . . . | 1 | $I_0$ | $3U_0$ | $7I_0$ | 0,09 | $R_i + r_{тр}$ | 1 | $I_0D$ | $1{,}2n\sqrt{I_2^2 - I_0^2}$ |
| Двухполупериодная . . . | 2 | $\frac{I_0}{2}$ | $3U_0$ | $3{,}5I_0$ | 0,18 | $R_i + r_{тр}$ | 2 | $\frac{I_0D}{2}$ | $1{,}7nI_2$ |
| Мостиковая . . . . . . | 4 | $\frac{I_0}{2}$ | $1{,}5U_0$ | $3{,}5I_0$ | 0,15 | $2R_i + r_{тр}$ $(2N \cdot r_i + r_{тр})$ | 2 | $\frac{I_0D}{1{,}4}$ | $1{,}2nI_2$ |
| Удвоения . . . . . . . | 2 | $I_0$ | $1{,}5U_0$ | $7I_0$ | 0,04 | $R_i + r_{тр}$ | 1 | $I_0D\ 1{,}4$ | $1{,}2nI_2$ |

3. Импульс тока равен:

$$I_{макс} = 3,5\, I_0 = 3,5 \cdot 100 = 350\ ма.$$

4. Подходящим кенотроном является двуханодный кенотрон типа 5Ц4С, у которого (см. табл. 1) допустимый выпрямленный ток одного анода составляет 62 *ма*, допустимое обратное напряжение 1 350 *в* и допустимый импульс тока для одного анода 375 *ма*.

Так как все допустимые величины у выбранного кенотрона больше тех, которые будут при работе схемы, то кенотрон 5Ц4С выбран правильно.

**Пример 3.** Необходимо выбрать селеновый столбик для схемы удвоения (фиг. 14), дающей на выходе напряжение $U_0 = 1\,000$ *в* при токе $I_0 = 8$ *ма*.

По формулам табл. 3 находим, что выпрямленный ток в одном плече равен $I_0 = 8$ *ма*, а обратное напряжение равно $U_{обр} = 1,5\, U_0 = 1,5 \cdot 1\,000 = 1\,500$ *в*.

На этом основании из табл. 2 находим, что выпрямительные столбики можно составить из дисков диаметром 10 *мм*, а так как допустимое обратное напряжение на один диск составляет 25 *в*, то количество дисков $N$ в одном плече должно быть не менее

$$N = \frac{U_{обр}}{25} = \frac{1\,500}{25} = 60\ \text{дисков.}$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ФАЗЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Для расчета кенотронного или селенового выпрямителя необходимо определить полное сопротивление фазы выпрямителя $R_ф$.

Полное сопротивление фазы выпрямителя $R_ф$ слагается из внутреннего сопротивления кенотронов или селеновых выпрямителей, включенных в фазу, и из сопротивления обмоток трансформатора, участвующих в работе этой фазы.

Фазой выпрямителя мы будем называть цепь, в которой происходит процесс выпрямления. В однополупериодной схеме (фиг. 11) существует только одна фаза, в которую включена вторичная обмотка трансформатора и один кенотрон. В двухполупериодной схеме имеются две фазы, при этом в цепь фазы схемы (фиг. 12) включен один анод кенотрона, а в работе каждой фазы двухполупериодной схемы участвует только половина вторичной обмотки трансформатора. Мостиковая схема (фиг. 13) образует две фазы: в одну из них включены последовательно соединенные селеновые выпрямители *1* и *3*, а в другую — *2* и *4*.

В схеме удвоения (фиг. 14) также имеются две фазы с кенотроном в каждой из них.



Очевидно, что общее внутреннее сопротивление кенотронов или селеновых выпрямителей, включенных в фазу, для всех схем, кроме мостиковой, равно внутреннему сопротивлению кенотрона $R_i$ или внутреннему сопротивлению плеча селенового выпрямителя $Nr_i$ ($N$ — число дисков в плече). Для мостиковой схемы общее внутреннее сопротивление соответственно равно $2R_i$ или $2Nr_i$. Значения $R_i$ для кенотронов приведены в табл. 1, а значения $r_i$ для селеновых дисков — в табл. 2.

Иногда может оказаться необходимым включить в одно плечо схемы выпрямителя не один анод кенотрона, как это сделано в примере 2, а оба анода кенотрона (или даже два кенотрона). Такое параллельное включение анодов одного кенотрона (или кенотронов) бывает вызвано отсутствием кенотрона, способного обеспечить нужный выпрямленный ток. Например, если бы в примере 2 потребовался ток не 100, а 200 *ма*, а в наличии были бы только кенотроны типа 5Ц4С, то в каждое плечо схемы нужно было бы включить по одному кенотрону с параллельно включенными анодами. То же самое относится и к включению селеновых столбиков.

При подсчете внутреннего сопротивления надо помнить, что при параллельном включении анодов кенотронов или селеновых выпрямителей их внутреннее сопротивление соответственно уменьшается по сравнению с значениями, приведенными в табл. 1 и 2 (при параллельном включении двух анодов — в 2 раза, трех анодов — в 3 раза и т. д.).

Второе слагаемое сопротивления фазы — сопротивление обмоток трансформатора $r_{тр}$ — представляет собой сопротивление вторичной обмотки, участвующей в работе фазы плюс так называемое приведенное сопротивление первичной обмотки. Так как величина сопротивления обмоток трансформатора $r_{тр}$ в начале расчета выпрямителя обычно неизвестна, то ее определяют приближенно с помощью следующей формулы[1], полученной на основании практических данных:

$$r_{тр} = k\,\frac{U_0}{I_0 \sqrt[4]{U_0 I_0}} \qquad (2)$$

Значения коэффициента $k$ приведены в табл. 3. Там же приведена величина полного сопротивления фазы $R_ф$ в за-

[1] Формула предложена инж. Е. И. Каретниковой.

висимости от схемы выпрямителя. Для упрощения вычислений значения величины $\frac{U_0}{I_0\sqrt[4]{U_0 I_0}}$ можно найти из графика фиг. 21.

Если мощность дополнительных обмоток составляет более 50% мощности анодной обмотки рассчитываемого выпрямителя, то полное сопротивление трансформатора определяется по формуле

$$r_{тр.\ с\ доп.\ обм} = \frac{r_{тр}}{2}\left(1 + \frac{P_2}{P_{габ}}\right),$$

где $r_{тр}$ — сопротивление трансформатора, полученное из кривых фиг. 21;

$P_2$ — мощность анодной обмотки, *ва*;

$P_{габ}$ — габаритная мощность трансформатора, *ва*.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Для определения необходимого напряжения вторичной обмотки, а также и для определения других параметров выпрямителя нам понадобится вычислить вспомогательный коэффициент $A$:

$$A = \frac{3,14 I_0 R_ф}{m U_0}. \qquad (3)$$

В этой формуле

$I_0$ — полный выпрямленный ток, *а*;

$U_0$ — полное выпрямленное напряжение, *в*;

$R_ф$ — полное сопротивление фазы выпрямителя, *ом*;

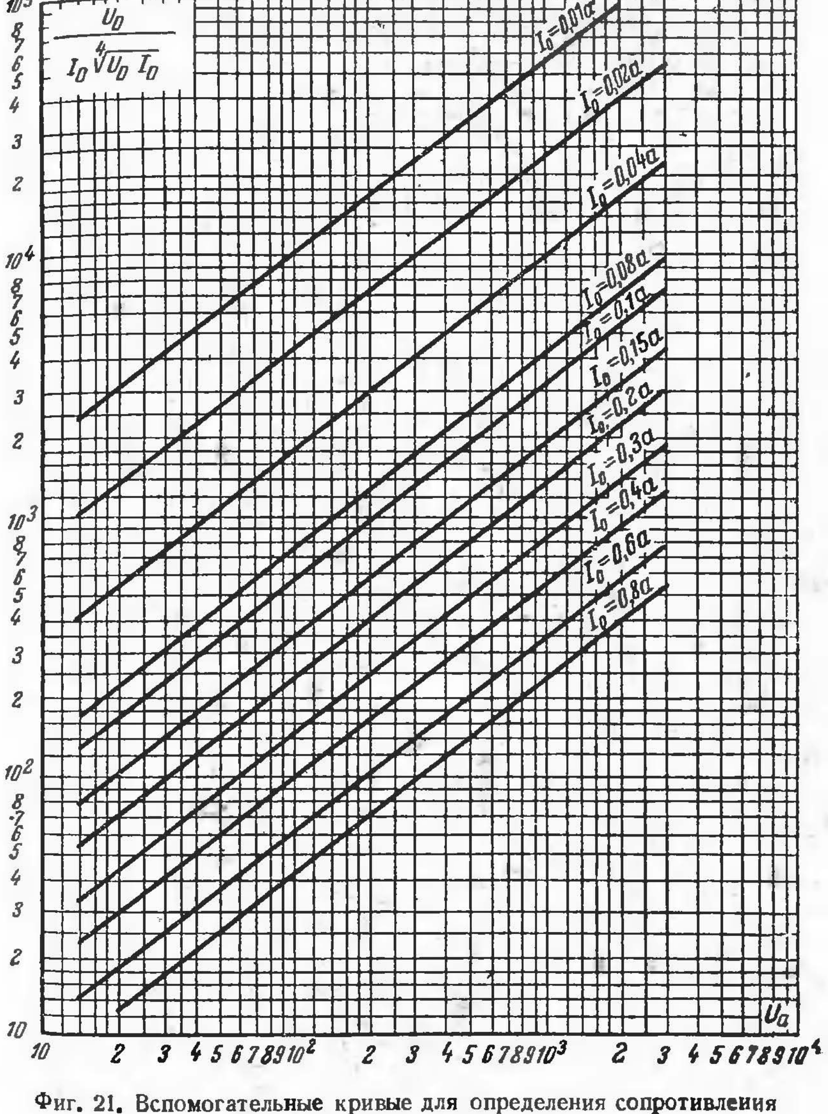
$m$ — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя (см. табл. 3).

Зная коэффициент $A$, легко определить требуемое напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_2$ из выражения:

$$U_2 = U_0(0,75 + 1,2A). \qquad (4)$$

Следует отметить, что при расчете схемы удвоения в формулы (3) и (4) следует подставлять значение выпрям-






Фиг. 21. Вспомогательные кривые для определения сопротивления трансформатора выпрямителя.

ленного напряжения, равное половине полного напряжения, даваемого схемой, т. е. $\frac{U_0}{2}$.

Рассмотрим два примера.

**Пример 4.** Определить напряжение вторичной обмотки для двух полупериодной схемы с данными из примера 2.

1. Найдем полное сопротивление фазы $R_ф$. Для кенотрона 5Ц4 находим из табл. 1 величину $R_i$:

$$R_i = 150\ ом.$$

По формуле (2) и из табл. 3 находим сопротивление трансформатора

$$r_{тр} = k\frac{U_0}{I_0\sqrt[4]{U_0 I_0}} = 0{,}18\frac{300}{0{,}1\sqrt[4]{300\cdot 0{,}1}} = 230\ ом.$$

Отсюда $R_ф = 150 + 230 = 380\ ом$.

2. Коэффициент $A$ по формуле (3) равен:

$$A = \frac{3{,}14\, I_0 R_ф}{mU_0} = \frac{3{,}14\cdot 0{,}1\cdot 380}{2\cdot 300} = 0{,}2.$$

3. Напряжение вторичной обмотки по формуле (4) равно:

$$U_2 = U_0(0{,}75 + 1{,}2\,A) = 300\,(0{,}75 + 1{,}2\cdot 0{,}2) = 297\ в.$$

**Пример 5.** Определить $U_2$ для схемы удвоения с данными из примера 3.

1. По формуле (1) находим сопротивление селенового диска диаметром 10 *мм* при токе 8 *ма*

$$r_i = r_{i\,табл}\sqrt{\frac{I_{0\,доп}}{I_0}} = 80\sqrt{\frac{10}{8}} \approx 90\ ом.$$

2. Сопротивление столбика из 60 дисков составит:

$$N\cdot r_i = 60\cdot 90 = 5\,400\ ом.$$

3. Сопротивление трансформатора равно:

$$r_{тр} = k\frac{U_0}{I_0\sqrt[4]{U_0 I_0}} = 0{,}04\frac{1\,000}{0{,}008\sqrt[4]{1\,000\cdot 0{,}008}} \approx 3\,000\ ом.$$



4. Сопротивление фазы составляет:

$$R_ф = Nr_i + r_{тр} = 5\,400 + 3\,000 = 8\,400\ ом.$$

5. Коэффициент $A$ равен:

$$A = \frac{3{,}14\cdot I_0 R_ф}{mU_0} = \frac{3{,}14\cdot 0{,}008\cdot 8\,400}{1\cdot\frac{1\,000}{2}} = 0{,}42.$$

6. Напряжение вторичной обмотки равно:

$$U_2 = U_0(0{,}75 + 1{,}2A) = \frac{1\,000}{2}(0{,}75 + 1{,}2\cdot 0{,}42) = 625\ в.$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ВТОРИЧНОЙ И ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Для определения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора предварительно нужно вычислить вспомогательный коэффициент $D$:

$$D = 2 + \frac{3{,}65}{100A}. \tag{5}$$

Величина $A$ определяется из формулы (3), приведенной в предыдущем параграфе.

Зная коэффициент $D$ и полный выпрямленный ток $I_0$, можно по формулам табл. 3 найти значение тока вторичной обмотки трансформатора $I_2$ в зависимости от схемы выпрямителя.

Значение тока первичной обмотки $I_1$ определяется по формулам, также помещенным в табл. 3.

При этом для определения тока $I_1$ нужно заранее вычислить коэффициент трансформации трансформатора $n$, определяемый как отношение напряжения вторичной обмотки $U_2$ к напряжению первичной обмотки $U_1$, включаемой в питающую сеть,

$$n = \frac{U_2}{U_1}.$$

Формулы для определения тока первичной обмотки, приведенные в табл. 3, даны с учетом тока холостого хода трансформатора. Если кроме анодной обмотки трансформатор имеет еще обмотки накала (или другие обмотки),

то общий ток первичной обмотки находится, как сумма токов

$$I_{1\,общ} = I_1 + I_3 \frac{U_3}{U_1} + I_4 \frac{U_4}{U_1} + \ldots, \qquad (6)$$

где $I_1$ — определяется по формулам табл. 3;
$U_1$ — напряжение первичной (сетевой) обмотки, в;
$I_3$, $I_4$ и т. д. — токи дополнительных обмоток, *а*;
$U_3$, $U_4$ и т. д. — напряжения дополнительных обмоток, *в*.

Определив значения напряжений и токов обмоток, мы получим, таким образом, необходимые данные для расчета трансформатора выпрямителя.

Приведем примеры расчета токов $I_2$ и $I_1$.

**Пример 6.** Найти токи вторичной и первичной обмоток трансформатора выпрямителя по данным примера 4. Напряжение на первичной обмотке (напряжение сети) $U_1 = 120$ *в*.

1. Находим коэффициент $D$ по формуле (5):

$$D = 2 + \frac{3{,}65}{100\,A} = 2 + \frac{3{,}65}{100 \cdot 0{,}2} = 2{,}18\,.$$

2. Из табл. 3 находим, что $I_2$ для двухполупериодной схемы равно:

$$I_2 = \frac{I_0}{2} D = \frac{0{,}1}{2} 2{,}18 = 0{,}109\ a.$$

3. Коэффициент трансформации

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{297}{120} \approx 2{,}5\,.$$

4. Ток первичной обмотки $I_1$ равен (табл. 3):

$$I_1 = 1{,}7\,nI_2 = 1{,}7 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}109 = 0{,}465\ a\,.$$

**Пример 7.** Найти токи $I_2$ и $I_1$ в трансформаторе выпрямителя по данным примера 5. Напряжение питающей сети равно 220 *в*.

1. Находим коэффициент $D$ по формуле (5):

$$D = 2 + \frac{3{,}65}{100\,A} = 2 + \frac{3{,}65}{100 \cdot 0{,}42} = 2{,}09\,.$$

2. Для схемы удвоения (табл. 3)

$$I_2 = 1{,}4\,I_0 D = 1{,}4 \cdot 0{,}008 \cdot 2{,}09 = 0{,}023\ a\,.$$

3.
$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{625}{220} = 2{,}9.$$

4. Ток первичной обмотки равен (табл. 3):

$$I_1 = 1{,}2\,nI_2 = 1{,}2 \cdot 2{,}9 \cdot 0{,}023 = 0{,}08\ a.$$



**Пример 8.** Найти ток первичной обмотки трансформатора из примера 6, если трансформатор имеет две дополнительные обмотки накала: $U_3 = 5$ *в*, $I_3 = 2$ *а*; $U_4 = 6{,}3$ *в*; $I_4 = 3$ *а*.

По формуле (6) находим:

$$I_{1\,общ} = I_1 + I_3 \frac{U_3}{U_1} + I_4 \frac{U_4}{U_1} = 0{,}465 + \frac{2 \cdot 5}{120} + \frac{3 \cdot 6{,}3}{120} = 0{,}706\ a\,.$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВХОДНОЙ ЕМКОСТИ ФИЛЬТРА ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Как было указано ранее, величина входной емкости фильтра $C_0$ должна быть определена при расчете выпрямителя, так как от правильного выбора этой емкости зависит нормальная работа выпрямителя.

Значение входной емкости $C_0$ (в микрофарадах) определяется из формулы

$$C_0 = \frac{20\,000\,A}{R_ф}\,. \qquad (7)$$

По этой же формуле определяется значение каждой из двух входных емкостей ($C_{01}$ и $C_{02}$) в схеме удвоения (фиг. 14).

При расчетном значении емкости $C_0$, полученном из формулы (7), амплитуда пульсации на выходе выпрямителя (на емкости $C_0$) составит около 10% от выпрямленного напряжения. Если в выпрямитель поставить емкость $C_0$ больше или меньше расчетной, то указанная амплитуда пульсации (10%) соответственно уменьшится или увеличится. Например, при увеличении емкости $C_0$ в 2 раза амплитуда пульсации уменьшится также в 2 раза (до 5%); при уменьшении емкости в 1,5 раза амплитуда пульсации возрастет до 15%. При этом надо иметь в виду, что уменьшение емкости более чем в 2 раза по сравнению с расчетной не допускается. Рабочее напряжение выбранного конденсатора должно быть по величине на 15—20% больше выпрямленного напряжения $U_0$, а для схемы удвоения — на 15—20% больше $\frac{U_0}{2}$.

**Пример 9.** Определить входную емкость $C_0$ для выпрямителя по данным примера 4.

По формуле (7) найдем:

$$C_0 = \frac{20\,000\,A}{R_ф} = \frac{20\,000 \cdot 0{,}2}{380} = 10\ мкф.$$

Рабочее напряжение конденсатора должно быть не менее 350 *в*.

**Пример 10.** Определить входные емкости $C_{01}$ и $C_{02}$ для схемы удвоения по данным примера 5:

$$C_{01}=C_{02}=\frac{20\,000\cdot A}{R_{ф}}=\frac{20\,000\cdot 0{,}42}{8\,400}=1 \text{ мкф}.$$

Рабочее напряжение каждого конденсатора должно быть не менее 600 *в*. Так как электролитических конденсаторов с таким рабочим напряжением нет, то нужно применить бумажные конденсаторы.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОКА НАГРУЗКИ

Часто, в особенности в условиях радиолюбительской практики, возникает необходимость использовать существующий выпрямитель для питания нагрузки, отличающейся от той, на которую был рассчитан этот выпрямитель.

Известно, что при увеличении тока нагрузки выпрямителя $I_0$ выпрямленное напряжение $U_0$ падает, а при уменьшении тока нагрузки выпрямленное напряжение возрастает.

Для того чтобы определить, какое выпрямленное напряжение даст выпрямитель при любом токе нагрузки, можно воспользоваться приближенной формулой

$$U_0=1{,}3U_2-I_0\frac{4R_{ф}}{m}. \qquad (8)$$

В этой формуле

$U_2$ — напряжение на вторичной обмотке трансформатора, *в*;

$I_0$ — ток нагрузки, *а*;

$R_{ф}$ — сопротивление фазы выпрямителя, *ом* (см. табл. 3);

$m$ — коэффициент, зависящий от схемы (см. табл. 3).

Для схемы удвоения формула (8) дает значение $\frac{U_0}{2}$

При использовании готового выпрямителя не следует забывать, что увеличение тока нагрузки $I_0$ допустимо лишь до такой величины, при которой кенотрон, селеновый выпрямитель или обмотки трансформатора не будут перегружаться. Эта величина ($I_{0доп}$) указана в табл. 1 и 2.

Приведем примеры расчета по формуле (8).



**Пример 11.** Определить выпрямленное напряжение выпрямителя, изготовленного по данным примера 4 при токе нагрузки $I_0=50$ *ма*:

$$U_0=1{,}3\,U_2-I_0\frac{4R_{ф}}{m}=1{,}3\cdot 297-0{,}05\,\frac{4\cdot 380}{2}=347 \text{ в}.$$

Таким образом, выпрямленное напряжение увеличилось на 47 *в* по сравнению с расчетным, т. е. на 16%.

**Пример 12.** Определить выпрямленное напряжение схемы удвоения, выполненной по данным примера 5 при токе нагрузки 5 *ма*:

$$U_0=2\left(1{,}3\,U_2-I_0\frac{4R_{ф}}{m}\right)=2\left(1{,}3\cdot 625-0{,}005\,\frac{4\cdot 8\,400}{1}\right)=1\,286 \text{ в}.$$

В этом случае выпрямленное напряжение увеличилось на 286 *в*, т. е. на 29%.

## РАСЧЕТ СХЕМ УМНОЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Расчет выпрямителей с умножением напряжения (фиг. 16) отличается от расчета обычных схем выпрямителей. Мы приведем здесь только некоторые приближенные формулы.

Напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_2$ можно определить из формулы

$$U_2=\frac{0{,}85U_0}{K}, \qquad (9)$$

где $U_0$ — полное выпрямленное напряжение, *в*;

$K$ — число каскадов умножения (в схеме фиг. 16 $K=4$).

При выборе кенотрона или селенового выпрямителя для схемы умножения следует иметь в виду, что обратное напряжение на любом каскаде равно $2{,}8U_2$.

Емкость конденсатора каждого каскада должна быть не меньше величины, определяемой из формулы

$$C=\frac{I_0}{fU_0}2K(K+2)\cdot 10^6. \qquad (10)$$

В этой формуле $I_0$ — выпрямленный ток, *а*;

$U_0$ — выпрямленное напряжение, *в*;

$f$ — частота сети, *гц*;

$C$ — емкость, *мкф*.

Если выбранная емкость соответствует величине, полученной из формулы (10), то амплитуда пульсации на выходе выпрямителя будет составлять около 6% от выпрямленного напряжения.

Рабочее напряжение на каждом конденсаторе (кроме первого) равно $\frac{2U_0}{K}$; на первом конденсаторе ($C_1$ на фиг. 16) рабочее напряжение равно $\frac{U_0}{K}$.

Следует ещё раз подчеркнуть, что схемы умножения напряжения применяются при малых выпрямленных токах.

**Пример 13.** Рассчитать схему учетверения напряжения на селеновых выпрямителях (фиг. 16) по следующим данным: $U_0 = 4\,000$ *в*; $I_0 = 1$ *ма*. Частота сети $f = 50$ *гц*, $K = 4$.

1. Напряжение вторичной обмотки трансформатора [формула (9)]

$$U_2 = \frac{0{,}85\,U_0}{K} = \frac{0{,}85 \cdot 4\,000}{4} = 850\ в.$$

2. Из табл. 2 выбираем селеновые диски диаметром 5 *мм*, так как $I_0 = 1$ *ма*.

3. Обратное напряжение на одном каскаде умножения

$$U_{обр} = 2{,}8\,U_2 = 2{,}8 \cdot 850 = 2\,400\ в.$$

4. Число дисков в одном каскаде

$$N = \frac{2\,400}{25} = 96 \approx 100 \quad дисков.$$

5. Емкость конденсатора каскада [формула (10)]

$$C = \frac{I_0}{fU_0} 2K(K+2) \cdot 10^6 = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 4 \cdot (4+2)}{50 \cdot 4 \cdot 10^3} \cdot 10^6 \approx 0{,}25\ мкф.$$

6. Рабочее напряжение конденсаторов $C_2$, $C_3$, $C_4$

$$\frac{2U_0}{K} = \frac{2 \cdot 4\,000}{4} = 2\,000\ в.$$

7. Рабочее напряжение конденсатора $C_1$

$$\frac{U_0}{K} = \frac{4\,000}{4} = 1\,000\ в$$

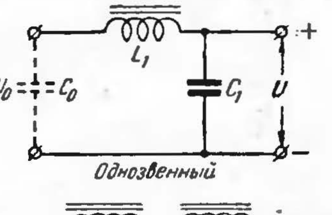
## РАСЧЕТ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

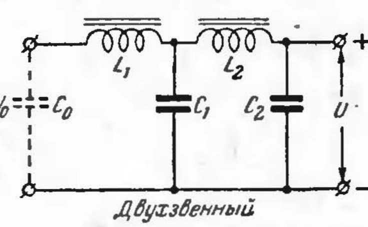
Для уменьшения величины пульсации выпрямленных напряжений применяются сглаживающие фильтры. Фильтры к выпрямителям, работающим на емкость, представляют собой одно или два Г-образных звена, состоящих из индуктивности $L$ и емкости $C$ (фильтры $LC$, фиг. 22) или из сопротивления $R$ и емкости $C$ (фильтры $RC$, фиг. 23).



Фильтры типа $LC$ обычно применяются для сглаживания при выпрямленных токах выше 15—20 *ма*. При меньших токах имеет смысл применять фильтры типа $RC$.

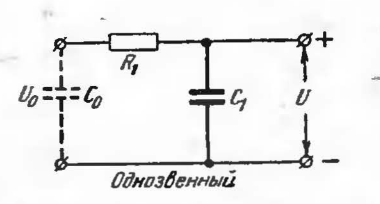
Второе звено добавляется к фильтру в тех случаях, когда нужно улучшить его фильтрацию. Двухзвенный фильтр может быть применен также и тогда, когда элементы однозвенного фильтра ($L$, $R$ или $C$) получаются громоздкими и неудобными для выполнения.

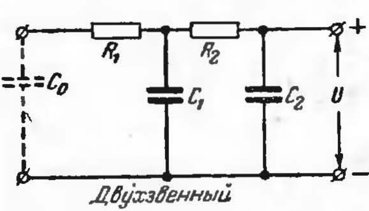



Фиг. 22. Схемы сглаживающих фильтров типа $LC$.

Встречаются комбинированные фильтры, одно звено которых представляет собой фильтр $LC$, а другое звено— фильтр $RC$ (фиг. 24,*а*). После первого звена ($LC$) обычно включается нагрузка, не требующая высокой степени сглаживания (например, двухтактный оконечный каскад усилителя низкой частоты), а после второго звена ($RC$)—нагрузка, требующая более высокой фильтрации (например, первые каскады усилителя низкой или высокой частоты). Очевидно, что чем больше индуктивность $L$, емкость $C$ или сопротивление $R$ всякого фильтра, тем лучше фильтрация, т. е. тем меньше пульсация на его выходе.

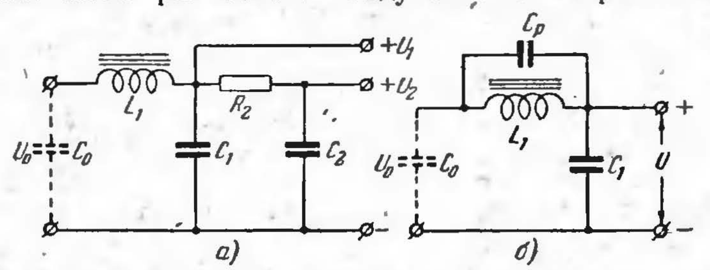



Фиг. 23. Схемы сглаживающих фильтров типа $RC$.

Иногда применяются так называемые фильтры-„пробки„, включающие в себя колебательный контур $LC_р$, настроенный на частоту пульсации (фиг. 24,*б*). Контур $LC_р$ пред-

ставляет собой большое сопротивление для частоты пульсации; величина этого сопротивления может быть в несколько раз больше индуктивного сопротивления




Фиг. 24. Схемы комбинированного фильтра и фильтра-„пробки".

дросселя. Поэтому включение резонансной емкости $C_p$ улучшает фильтрацию обычного звена $LC$.

## РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ

Значения $L$ и $C$ сглаживающего фильтра (фиг. 22) зависят от заданной величины пульсации выпрямленного напряжения на выходе фильтра. Допустимая амплитуда пульсации в процентах от выпрямленного напряжения ($u\%$) зависит от характера нагрузки выпрямителя. Допустимые значения $u\%$ для различных нагрузок приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Допустимые значения пульсации**

| Характер нагрузки выпрямителя | Допустимая амплитуда пульсации в % от выпрямленного напряжения, $u$ % |
|---|---|
| Оконечный каскад телефонного передатчика . . . | 0,05 — 0,1 |
| Промежуточные каскады телефонного передатчика | 0,02 — 0,1 |
| Двухтактный мощный каскад усилителя низкой частоты . . . . . . . . . . . . . . . . | 0,5 — 3 |
| Однотактный мощный каскад усилителя низкой частоты . . . . . . . . . . . . . . . . | 0,1 — 0,5 |
| Промежуточные каскады усилителя низкой частоты и каскады усиления высокой частоты приемника | 0,01 — 0,1 |
| Аноды электронно-лучевых трубок . . . . . . . | 0,5 — 2 |
| Электронные и газовые стабилизаторы напряжения | 0,5 — 2 |



При расчете значений $L$ и $C$ фильтра мы будем предполагать, что входная емкость фильтра $C_0$ выбрана в соответствии с формулой (7). Тогда необходимое произведение $LC$ для однозвенного фильтра можно определить из выражения

$$L_1C_1 = \frac{100}{p^2 u\%}. \qquad (11)$$

В этой формуле $L_1$ — индуктивность дросселя фильтра, *гн*;
$C_1$ — емкость фильтра, *мкф*;
$u\%$ — пульсация в процентах от выпрямленного напряжения (см. табл. 4);
$p = 1$ — для однополупериодной схемы;
$p = 2$ — для схем: двухполупериодной, мостиковой и схемы удвоения напряжения.

При больших значениях $LC$ (больше 100—200) можно рекомендовать применение двухзвенного фильтра с одинаковыми звеньями. Величину $LC$ для каждого звена можно определить по формуле

$$L_1C_1 = L_2C_2 = \frac{32}{p^2\sqrt{u\%}}. \qquad (12)$$

Если действительная величина входной емкости фильтра $C_0$ больше (или меньше) расчетной, определяемой формулой (7), то полученное произведение $LC$ нужно во столько же раз уменьшить (или увеличить).

Если нужно улучшить фильтрацию имеющегося однозвенного фильтра $LC$, то это можно сделать, превратив его в фильтр-„пробку" (фиг. 24,б). Для этого параллельно дросселю $L_1$ нужно включить конденсатор $C_p$ определенной емкости, величину которой легко найти из формулы

$$C_p = \frac{10}{p^2 L_1}, \qquad (13)$$

где $C_p$ — емкость, включаемая параллельно дросселю, *мкф*;
$L_1$ — индуктивность дросселя, *гн*;
$p$ — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя [см. формулу (11)].

Добавление емкости $C_p$ к обычному однозвенному фильтру $LC$ улучшает фильтрацию в 3—8 раз в зависимости от параметров дросселя.

Зная произведение $LC$, нужно выбрать значения $L$ и $C$ для данного фильтра. Произвольно выбирать значения $L$ и $C$ нельзя. Для нормальной работы фильтра необходимо, чтобы емкость выходного конденсатора фильтра $C_1$ (или $C_2$) была бы не меньше величины, определяемой из формулы

$$C_{мин} = 15\,000\frac{I_0}{pU}, \qquad (14)$$

где $C$ — емкость на выходе фильтра, *мкф*;
$I_0$ — полный выпрямленный ток, *а*;
$p$ — коэффициент [см. формулу (11)];
$U$ — выпрямленное напряжение на выходе фильтра, *в*.

Выпрямленное напряжение на выходе фильтра $U$ меньше полного выпрямленного напряжения выпрямителя $U_0$ на величину падения напряжения на дросселе. Падение напряжения на дросселе $U_{др}$ зависит от выпрямленного тока $I_0$ и от активного (омического) сопротивления обмотки дросселя $r_{др}$

$$U_{др} = I_0 r_{др}.$$

Таким образом, выпрямленное напряжение на выходе фильтра равно:

$$U = U_0 - U_{др} = U_0 - I_0 r_{др}.$$

Так как точная величина падения напряжения $U_{др}$ станет известна только после конструктивного расчета дросселя, то для ориентировочных расчетов можно считать, что падение напряжения на дросселе составляет 20—50 *в*. При расчете выпрямителя всегда надо учитывать падение напряжения на дросселе и к заданной величине выпрямленного напряжения $U$ добавлять соответствующее падение напряжения $U_{др}$.

Проделаем расчет сглаживающего фильтра.

**Пример 14.** Рассчитать фильтр для выпрямителя, питающего оконечный однотактный каскад усилителя низкой частоты. Выпрямленное напряжение на нагрузке: $U = 300$ *в*; выпрямленный ток $I_0 = 0{,}1$ *а*. Схема выпрямителя двухполупериодная.

1. Из табл. 4 находим, что допустимая пульсация на выходе фильтра составляет около 0,3%. По величине выпрямленного тока выбираем фильтр типа $LC$.



2. Полагая, что входная емкость фильтра $C_0$ выбрана правильно [по формуле (7)], находим произведение $LC$ из формулы (11)

$$L_1C_1 = \frac{100}{p^2u\%} = \frac{100}{2^2\cdot 0{,}3} = 84.$$

3. Минимально допустимую емкость на выходе фильтра определяем по формуле (14)

$$C_{1\,мин} = 15\,000\frac{I_0}{pU} = 15\,000\frac{0{,}1}{2\cdot 300} = 2{,}5 \text{ мкф}.$$

Принимаем емкость на выходе фильтра равной $C_1 = 10$ *мкф* с рабочим напряжением не ниже 400 *в* (например, электролитический конденсатор).

4. $$L_1 = \frac{L_1C_1}{C_1} = \frac{84}{10} = 8{,}4 \text{ гн}.$$

**Пример 15.** Улучшить фильтрацию однозвенного сглаживающего фильтра $LC$, рассчитанного в примере 14, преобразовав его в фильтр-„пробку" (фиг. 24,*б*).

Для этой цели параллельно дросселю $L_1 = 8{,}4$ *гн* нужно подключить емкость $C_p$, определяемую по формуле (13):

$$C_p = \frac{10}{p^2L} = \frac{10}{2^2\cdot 8{,}4} = 0{,}3 \text{ мкф}.$$

## РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ

Расчет фильтра типа $RC$ почти не отличается от расчета фильтра типа $LC$. Так же как и в случае фильтра $LC$, будем предполагать, что входная емкость $C_0$ выбрана в соответствии с формулой (7).

Необходимое произведение $RC$ для однозвенного фильтра находится из формулы

$$RC = \frac{30\,000}{pu\%}; \qquad (15)$$

здесь $R$ — сопротивление фильтра, *ом*;
$C$ — емкость фильтра, *мкф*;
$u\%$ — пульсация в процентах от выпрямленного напряжения;
$p$ — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя [см. формулу 11)].

При больших значениях $RC$ (больше 50—100 тыс.) можно применить двухзвенный фильтр; тогда $RC$ каждого звена определяется по формуле

$$R_1C_1 = R_2C_2 = \frac{10\,000}{p\sqrt{u\%}}. \quad (16)$$

Максимально допустимая емкость выходного конденсатора фильтра ($C_1$ и $C_2$) определяется по формуле (14).

Падение напряжения $U_R$ на сопротивлении фильтра $R$ гораздо больше, чем падение на дросселе $U_{др}$ в фильтре типа $LC$. Допустимую величину падения напряжения $U_R$ выбирают, исходя из напряжения, даваемого выпрямителем, и режима работы питаемых от выпрямителя ламп.

**Пример 16.** Рассчитать фильтр $RC$ для цепи питания первых каскадов приемника. Необходимое напряжение питания $U = 150$ *в*; выпрямитель дает напряжение $U_0 = 300$ *в*, ток нагрузки $I_0 = 6$ *ма*. Выпрямитель собран по однополупериодной схеме

1. Из табл. 4 находим: $u\% = 0{,}05\%$.
2. По формуле (15) находим:

$$R_1C_1 = \frac{30\,000}{pu\%} = \frac{30\,000}{1 \cdot 0{,}05} = 600\,000.$$

3. Так как $RC$ очень велико, то надо сделать двухзвенный фильтр; по формуле (16) находим:

$$R_1C_1 = R_2C_2 = \frac{10\,000}{p\sqrt{u\%}} = \frac{10\,000}{1 \cdot \sqrt{0{,}05}} = 45\,000.$$

4. Из заданных условий находим падение напряжения на фильтре

$$U_R = 300 - 150 = 150 \text{ в}.$$

5. Падение напряжения на каждом звене составляет:

$$\frac{U_R}{2} = \frac{150}{2} = 75 \text{ в},$$

откуда

$$R_1 = R_2 = \frac{U_R}{2I_0} = \frac{75}{6 \cdot 10^{-3}} = 12\,500 \text{ ом},$$

$$C_1 = C_2 = \frac{RC}{R} = \frac{45\,000}{12\,500} = 3{,}6 \text{ мкф}.$$

Выбираем стандартную емкость $C_1 = C_2 = 4$ *мкф* с рабочим напряжением 400 *в*.



6. Проверим минимально допустимую емкость на выходе фильтра по формуле (14):

$$C_{2мин} = \frac{15\,000 I_0}{pU} = \frac{15\,000 \cdot 0{,}006}{1 \cdot 150} = 0{,}6 \text{ мкф}.$$

Выбранная емкость ($C_2 = 4$ *мкф*) больше $C_{2мин}$.

**Пример 17.** Рассчитать фильтр $RC$ для питания первых каскадов приемника. Напряжение питания $U = 150$ *в*; ток нагрузки 6 *ма*; $u\% = 0{,}05\%$. Использовать для питания и предварительной фильтрации выпрямитель и фильтр с данными примера 14.

Данный пример сводится к расчету комбинированного фильтра (фиг. 24,*а*).

1. Пульсация на выходе первого звена уже уменьшена по сравнению с пульсацией на входной емкости $C_0$ (10%) в $\frac{10\%}{0{,}3\%} = 33$ раза.

2. Следовательно, величину $RC$ второго звена, полученную по формуле (15), можно уменьшить в 33 раза:

$$R_2C_2 = \frac{30\,000}{pu\%} : 33 = \frac{30\,000}{2 \cdot 0{,}05 \cdot 33} = 9\,000.$$

3. Так как на выходе первого звена напряжение равно 300 *в* (см. пример 14), то на сопротивлении $R_2$ должно падать $U_R = 300 - 150 = 150$ *в*.

Отсюда

$$R_2 = \frac{U_R}{I_0} = \frac{150}{6 \cdot 10^{-3}} = 25\,000 \text{ ом}.$$

4. Емкость на выходе

$$C_2 = \frac{RC}{R} = \frac{9\,000}{25\,000} \approx 0{,}4 \text{ мкф}.$$

Минимально допустимая емкость на выходе равна:

$$C_{2мин} = \frac{15\,000 I_0}{pU} = 15\,000 \cdot \frac{0{,}006}{2 \cdot 150} = 0{,}3 \text{ мкф}.$$

Выбранная емкость ($C_2 = 0{,}4$ *мкф*) больше $C_{2мин}$.

Более подробные сведения о фильтрах можно найти в брошюре Д. А. Конашинского „Электрические фильтры", Массовая радиобиблиотека, вып. 26, Госэнергоиздат, 1949 г.

# КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ

Существует довольно много брошюр и журнальных статей, посвященных расчету и изготовлению маломощных трансформаторов и дросселей фильтров. Поэтому в данной главе мы рассмотрим только основные вопросы конструктивного расчета этих элементов, а именно: выбор сердечника и определение числа витков и диаметра провода. Вопросы изготовления трансформаторов и дросселей затронуты не будут.

## ВЫБОР СЕРДЕЧНИКА ДЛЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Размеры сердечника трансформатора зависят в первую очередь от его мощности. Для трансформаторов, работающих в некоторых схемах выпрямителей (в том числе в однополупериодной и двухполупериодной), понятие мощности трансформатора несколько усложняется тем, что мощность (вольтамперы) вторичной обмотки не равна мощности (вольтамперам) первичной обмотки из-за наличия во вторичной обмотке постоянной слагающей выпрямленного тока. Ввиду этого вводится понятие „габаритной мощности" трансформатора $P_{габ}$, которая представляет собой полусумму вольтампер первичной и всех остальных обмоток (второй, третьей и т. д.).

В табл. 5 даны значения габаритной мощности трансформатора в зависимости от схемы выпрямителя.

Таблица 5

**Зависимость габаритной мощности трансформатора от схемы выпрямителя**

| Схема выпрямителя | Габаритная мощность трансформатора $P_{габ}$, *ва* |
|---|---|
| Однополупериодная | $0,95\,U_2I_2$ |
| Двухполупериодная | $1,7\,U_2I_2$ |
| Мостиковая | $U_2I_2$ |
| Удвоения | $U_2I_2$ |

Для подсчета габаритной мощности трансформатора значения напряжения на вторичной обмотке $U_2$ и тока вторичной обмотки $I_2$ следует брать из расчета выпрямителя. Если один трансформатор работает на два или больше выпрямителей и имеет, кроме того, еще обмотки накала, то полная габаритная мощность трансформатора определяется как сумма всех габаритных мощностей.

**Пример 18.** Трансформатор имеет обмотку, работающую на однополупериодную схему выпрямителя ($U_2I_2$), обмотку, питающую двухполупериодную схему ($U_3I_3$), и две обмотки накала ($U_4$, $I_4$ и $U_5$, $I_5$). Определить габаритную мощность трансформатора:

$$P_{габ}=0,95U_2I_2+1,7U_3I_3+U_4I_4+U_5I_5 \text{ ва}.$$

Размеры сердечника определяются сечением его стали (железа) $Q_c$ и площадью окна $Q_o$, в котором располагается обмотка трансформатора. $Q_c$ и $Q_o$ сердечника связаны с габаритной мощностью трансформатора следующей формулой:

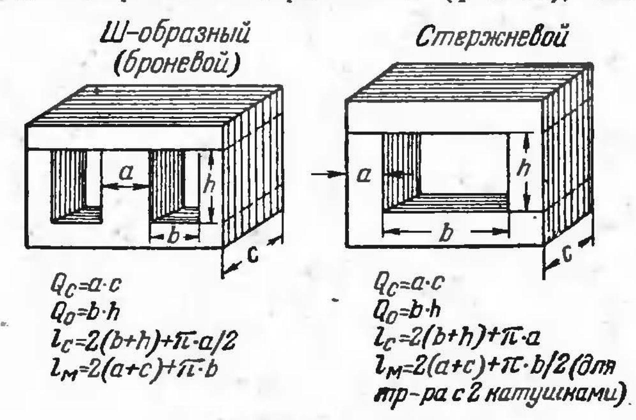
$$Q_cQ_o=1,6\,P_{габ}; \qquad (17)$$

здесь $Q_c$ — сечение стали сердечника, *см*²;

$Q_o$ — площадь окна сердечника, *см*²;

$P_{габ}$ — габаритная мощность трансформатора, *ва*.

Формула (17) одинаково пригодна как для Ш-образных, так и для стержневых сердечников (фиг. 25); она дает




Фиг. 25. Типы сердечников.

правильные результаты для трансформаторов с обмотками, выполненными из эмалированного провода (марки ПЭ или ПЭЛ), и при использовании нормальной трансформаторной

стали с толщиной пластин не более 0,5 *мм*, допускающей индукцию 10000 *гц* (марки Э4А или Э4АА). В случае применения проводов марки ПЭШО или ПШД полученный по формуле (17) результат следует увеличить в 1,3—1,5 раза. Плотность тока в обмотках трансформатора должна быть около 2—3 *а* на 1 *мм²* сечения проводов.

При расчете силовых трансформаторов малой мощности обычно используют сердечники, состоящие из пластин стандартной формы; площадь окна таких сердечников заранее известна. Поэтому, определив из формулы (17) величину произведения сечения сердечника на площадь окна ($Q_c Q_o$) и зная величину площади окна ($Q_o$), легко найти необходимое сечение сердечника ($Q_c$). Размеры стандартных пластин для сердечника желательно выбрать так, чтобы отношение толщины пакета сердечника к ширине стержня *a* (фиг. 25) было бы не более двух и не менее единицы.

Размеры некоторых употребительных стандартных пластин для сердечников даны в табл. 6.

Таблица 6

**Данные некоторых типов пластин для броневых (Ш-образных) сердечников (фиг. 25)**

| Тип пластин | *a*, *см* | *b*, *см* | *h*, *см* | $Q_o$, *см²* | $l_c$, *см* |
|---|---|---|---|---|---|
| Ш-11 | 1,1 | 1,15 | 3,4 | 3,9 | 10 |
| Ш-12 | 1,2 | 1,2 | 2,6 | 3,12 | 9,5 |
| Ш-15 | 1,5 | 1,35 | 2,4 | 3,24 | 10 |
| Ш-16 | 1,6 | 1,6 | 2,4 | 3,84 | 10,5 |
| Ш-16 | 1,6 | 1,6 | 3,8 | 6,08 | 13,35 |
| Ш-19 | 1,9 | 1,7 | 4,6 | 7,8 | 15 |
| Ш-20 | 2,0 | 1,0 | 3,0 | 3,0 | 12 |
| Ш-20 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 6,0 | 13,14 |
| Ш-20 | 2,0 | 2,0 | 5,0 | 10,0 | 17,14 |
| Ш-25 | 2,5 | 2,5 | 6,0 | 15,0 | 20 |
| Ш-25 | 2,5 | 2,5 | 6,25 | 15,6 | 21,4 |
| Ш-30 | 3,0 | 1,5 | 4,5 | 6,75 | 18 |
| Ш-32 | 3,2 | 3,2 | 8,0 | 25,6 | 27,4 |
| Ш-40 | 4,0 | 3,0 | 7,0 | 21,0 | 28 |
| Ш-40 | 4,0 | 4,0 | 10,0 | 40,0 | 34,3 |



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ВИТКОВ И ДИАМЕТРА ПРОВОДА ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Число витков первичной (сетевой) обмотки трансформатора определяется из формулы

$$w_1 = 50\frac{U_1}{Q_c}. \quad (18)$$

Число витков вторичной обмотки (и всех других обмоток) определяется по формуле

$$w = 56\frac{U}{Q_c}. \quad (19)$$

В формулах (18) и (19)

$w$ — число витков соответствующей обмотки;
$U$ — напряжение на соответствующей обмотке, *в*;
$Q_c$ — сечение стали сердечника, *см²* (фиг. 25).

Величины напряжений анодных обмоток должны быть взяты из расчета выпрямителя. Напряжения первичной (сетевой) обмотки и остальных обмоток (например накальных) выбираются в зависимости от требований к выпрямителю.

Формулы (18) и (19) выведены при условии, что индукция в сердечнике составляет около 10000 *гс*.

Диаметр проводов обмоток определяется из формулы

$$d = 0{,}7\sqrt{I}, \quad (20)$$

где $d$ — диаметр провода без изоляции, *мм*;
$I$ — сила тока в обмотке, *а*.

В формуле (20) плотность тока принята равной 2,5 *а/мм²*.

**Пример 19.** Определить габариты сердечника, число витков и диаметр проводов обмоток трансформатора, имеющего следующие данные (см. примеры 4, 6 и 8).

Напряжение сети $U_1 = 120$ *в*; ток первичной обмотки $I_{1общ} = 0{,}706$ *а*.

Напряжение вторичной обмотки для питания двухполупериодной схемы $U_2 = 297$ *в* (одно плечо); ток вторичной обмотки $I_2 = 0{,}109$ *а*.

Напряжение третьей обмотки для питания накала кенотрона 5Ц4С $U_3 = 5$ *в*; ток накала кенотрона $I_3 = 2$ *а*.

Напряжение четвертой обмотки для питания накала ламп приемника $U_4 = 6{,}3$ *в*. Ток накала ламп $I_4 = 3$ *а*.

Схема трансформатора приведена на фиг. 26.

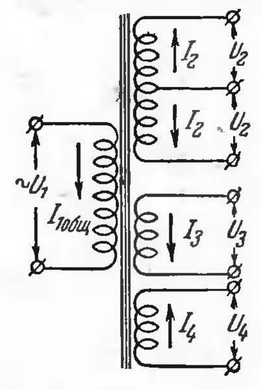
1. Габаритная мощность трансформатора, работающего на двухполупериодную схему и имеющего две накальные обмотки, составляет:

$$P_{габ} = 1{,}7 \cdot 297 \cdot 0{,}109 + 5 \cdot 2 + 6{,}3 \cdot 3 = 84 \text{ ва}.$$

2. Полагая, что обмотки будут выполнены из провода с эмалев изоляцией, находим по формуле (17):

$$Q_c Q_o = 1{,}6 P_{габ} = 1{,}6 \cdot 84 = 135\ см^4.$$

3. Из таблицы стандартных пластин (табл. 6) выбираем пласти Ш-25 с окном $b \cdot h = 25 \times 62{,}5$ *мм*. Тогда необходимое сечение ста составит:




Фиг. 26. Схема силового трансформатора.
$U_1 = 120$ *в*, $I_{1общ} = 0{,}706$ *а*
$U_2 = 297$ *в*, $I_2 = 0{,}109$ *а*
$U_3 = 5$ *в*, $I_3 = 2$ *а*
$U_4 = 6{,}3$ *в*, $I_4 = 3$ *а*

$$Q_c = \frac{Q_c Q_o}{b \cdot h} = \frac{135}{2{,}5 \cdot 6{,}25} = 8{,}65\ см^2.$$

4. Толщина пакета сердечника *c* до жна быть равна:

$$c = \frac{Q_c}{a} = \frac{8{,}65}{2{,}5} \approx 3{,}5\ см = 35\ мм.$$

Отношение $\frac{c}{a}$ больше единицы меньше двух; следовательно, пласти Ш-25 выбрана правильно.

5. Число витков первичной обмот [формула (18)]

$$w_1 = 50 \frac{U_1}{Q_c} = 50 \cdot \frac{120}{8{,}65} = 690\ витков.$$

6. Число витков остальных обмот [формула (19)]

$$w_2 = 56 \frac{U_2}{Q_c} = 56 \frac{297}{8{,}65} = 1\,920\ витков\ (одна\ половина\ обмотки);$$

$$w_3 = 56 \frac{5}{8{,}65} \approx 32\ витка;$$

$$w_4 = 56 \frac{6{,}3}{8{,}65} \approx 41\ виток.$$

7. По формуле (20) определяем диаметры проводов обмоток:

$$d_1 = 0{,}7 \sqrt{I_{1общ}} = 0{,}7 \sqrt{0{,}706} = 0{,}59\ мм;$$

$$d_2 = 0{,}7 \sqrt{0{,}109} = 0{,}23\ мм;$$

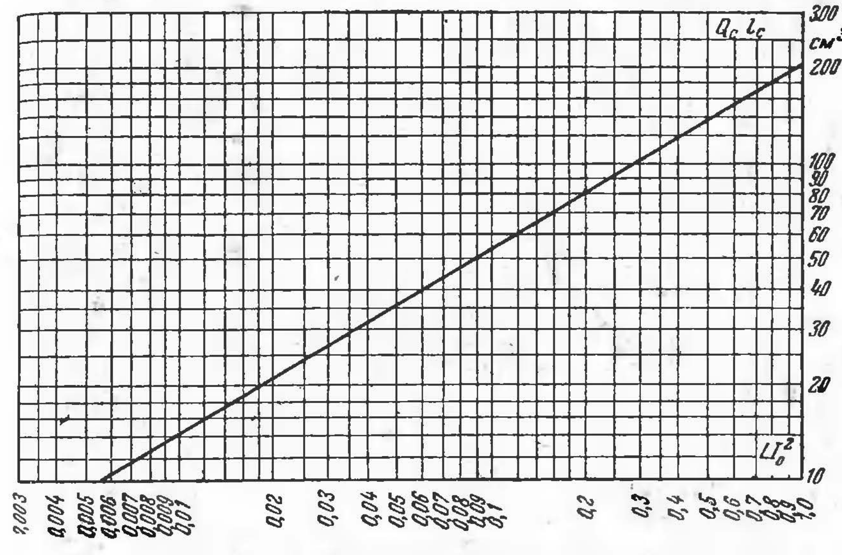
$$d_3 = 0{,}7 \sqrt{2} = 1\ мм;$$

$$d_4 = 0{,}7 \sqrt{3} = 1{,}2\ мм.$$



## ВЫБОР СЕРДЕЧНИКА ДЛЯ ДРОССЕЛЯ ФИЛЬТРА

Для определения габаритов сердечника дросселя фильтра можно воспользоваться графиком, приведенным на фиг. 27. График построен на основании практических данных. По горизонтали отложена заданная при расчете величина $LI_0^2$ (*L* — индуктивность дросселя, *гн*; $I_0$ — постоянный ток через дроссель, *а*); по вертикали справа отложено искомое произведение $Q_c l_c$ ($Q_c$ — сечение стали сердечника, *см*², $l_c$ — средняя длина магнитной силовой

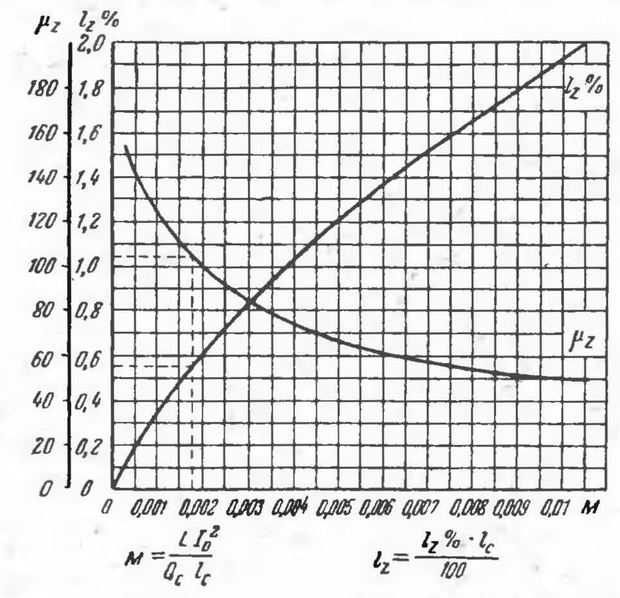



Фиг. 27. График для выбора сердечника дросселя фильтра.

линии, *см*). Величина $Q_c l_c$ представляет собой (с определенной степенью точности) объем сердечника.

Определив произведение $Q_c l_c$, нужно выбрать стандартную пластину сердечника (см. табл. 6), найти $l_c$ (см. фиг. 25) и вычислить необходимую величину сечения сердечника. При этом надо соблюдать соотношение между толщиной пакета и шириной стержня, рекомендованное ранее для трансформаторов ($\frac{c}{a} = 1 - 2$; см. фиг. 25).

Как правило, сердечники дросселей фильтров выпрямителей собираются с определенным воздушным зазором, который служит для уменьшения насыщения стали постоянным магнитным потоком. Этот постоянный магнитный поток создается в результате прохождения постоянного подмагничивающего тока по обмотке дросселя.




Фиг. 28. Кривые для определения длины воздушного зазора дросселя и величины магнитной проницаемости.

При наличии постоянного подмагничивающего тока дроссель с зазором имеет бо́льшую индуктивность, чем дроссель без зазора. Длина наивыгоднейшего воздушного зазора в процентах к $l_c$ определяется из кривой $l_z\%$ на фиг. 28. Для определения $l_z\%$ нужно вычислить вспомогательную величину $M=\frac{LI_0^2}{Q_c\ l_c}$, в зависимости от которой построена кривая $l_z\%$.

Полная длина наивыгоднейшего воздушного зазора будет равна:

$$l_z=\frac{l_z\% l_c}{100}. \qquad (21)$$



При сборке воздушный зазор в сердечниках, изображенных на фиг. 25, делится в силу их конструктивных особенностей на две части. Поэтому изоляционные прокладки, образующие воздушный зазор, должны иметь толщину $\frac{l_z}{2}$.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ВИТКОВ И ДИАМЕТРА ПРОВОДА ОБМОТКИ ДРОССЕЛЯ

Число витков дросселя определяется из следующей формулы:

$$w=10^4\sqrt{\frac{Ll_c}{1{,}26\mu_z Q_c}}; \qquad (22)$$

здесь $L$ — необходимая индуктивность дросселя, *гн*;

$l_c$ — средняя длина магнитной силовой линии, *см*;

$Q_c$ — сечение стали сердечника, *см*²;

$\mu_z$ — магнитная проницаемость стали с учетом наивыгоднейшего воздушного зазора.

Величину $\mu_z$ для стали марки Э4А и Э4АА можно найти из кривой $\mu_z$, изображенной на фиг. 28 в зависимости от уже известной вспомогательной величины $M$.

Допуская в обмотке дросселя плотность тока 2—3 *а/мм*², найдем диаметр провода обмотки из формулы

$$d=(0{,}65\div0{,}8)\sqrt{I_0}, \qquad (23)$$

где $d$ — диаметр провода без изоляции, *мм*;

$I_0$ — выпрямленный ток через дроссель, *а*.

Меньшие значения коэффициента (0,65 — 0,8), т. е. большую плотность тока, следует брать для малых дросселей, и наоборот. Так как полученное значение диаметра $d$ является приближенным, то рекомендуется расчетным путем проверить, умещается ли обмотка в окне сердечника. В случае, если обмотка не умещается, диаметр провода можно уменьшить; если остается много свободного места, то диаметр следует увеличить. Если обмотка дросселя будет выполнена из эмалированного провода (ПЭ, ПЭЛ), то для ориентировочной проверки заполнения

окна нужно подсчитать величину коэффициента заполнения

$$k_м = \frac{0,8wd^2}{100\,Q_o}. \qquad (24)$$

Если $k_м$ будет меньше, чем 0,3, то в окне остается свободное место; если $k_м$ больше, чем 0,4, то обмотка может не уместиться.

Сопротивление обмотки дросселя можно рассчитать по формуле

$$r_{др} = \frac{225 \cdot wl_м}{d^2 10^6}; \qquad (25)$$

здесь $w$ — число витков дросселя;

$d$ — диаметр провода без изоляции, *мм*;

$l_м$ — средняя длина витка обмотки, *см*.

Величина $l_м$ зависит от геометрических размеров сердечника и вычисляется по формуле, указанной на фиг. 25

После определения величины $r_{др}$ можно уточнить величину падения напряжения на дросселе

$$U_{др} = I_0 r_{др}.$$

**Пример 20.** Выбрать сердечник, определить величину наивыгоднейшего воздушного зазора, число витков и диаметр провода дросселя фильтра с индуктивностью $L = 8,4$ *гн* при постоянном подмагничивающем токе $I_0 = 0,1$ *а* (см. пример 14).

1. Находим величину

$$LI_0^2 = 8,4 \cdot 0,1^2 = 0,084.$$

2. По графику фиг. 27 находим:

$$Q_c l_c = 48 \text{ см}^3.$$

3. Выбираем пластину типа Ш-16 с окном размером 16×24 *мм* (см. табл. 6). У выбранной пластины

$$l_c = 10,5 \text{ см}.$$

4. Необходимое сечение сердечника дросселя равно:

$$Q_c = \frac{Q_c l_c}{l_c} = \frac{48}{10,5} = 4,57 \text{ см}^2.$$



5. Толщина пакета должна быть равна:

$$c = \frac{Q_c}{a} = \frac{4,57}{1,6} \approx 2,9 \text{ см}.$$

Таким образом, соотношение $\frac{c}{a} = 1,8$, что допустимо.

6. Для определения длины воздушного зазора найдем величину

$$M = \frac{LI_0^2}{Q_c l_c} = \frac{8,4 \cdot 0,1^2}{4,57 \cdot 10,5} = 0,00175.$$

Из графика фиг. 28 находим:

$$l_z\% = 0,55\%.$$

Полная длина зазора составляет [по формуле (21)]

$$l_z = \frac{l_z\% l_c}{100} = \frac{0,55 \cdot 10,5}{100} = 0,058 \text{ см} \approx 0,6 \text{ мм}.$$

Толщина изоляционной прокладки для зазора

$$\frac{l_z}{2} = 0,3 \text{ мм}.$$

7. Для определения числа витков дросселя найдем из графика фиг. 28 величину магнитной проницаемости $\mu_z$ в зависимости от $M$

$$\mu_z = 105.$$

Тогда число витков дросселя по формуле (22) будет равно:

$$w = 10^4 \sqrt{\frac{Ll_c}{1,26\mu_z Q_c}} = 10^4 \sqrt{\frac{8,4 \cdot 10,5}{1,26 \cdot 105 \cdot 4,57}} = 3\,820 \text{ витков}.$$

8. Диаметр провода найдем по формуле (23), полагая плотность тока в обмотке 2,5 *а/мм²*:

$$d = (0,65 - 0,8)\sqrt{I_0} = 0,7\sqrt{0,1} = 0,222 \text{ мм}.$$

Ближайший стандартный диаметр $d = 0,23$ *мм* (ПЭ или ПЭЛ).

9. Сделаем ориентировочную проверку заполнения окна по формуле (24):

$$k_м = \frac{0,8w \cdot d^2}{100 \cdot Q_o} = \frac{0,8 \cdot 3\,820 \cdot 0,23^2}{100 \cdot 1,6 \cdot 2,4} = 0,42.$$

Ориентировочный расчет заполнения показывает, что обмотка дросселя из провода диаметром 0,23 *мм* марки ПЭ (или ПЭЛ) умещается в окне сердечника, но требует плотной намотки, на что указывает коэффициент $k_м = 0,42$.

10. Сопротивление дросселя определяем по формуле (25). Для этого найдем среднюю длину витка обмотки (фиг. 25)

$$l_м = 2(a + c) + \pi b = 2(1,6 + 2,9) + \pi \cdot 1,6 = 14 \text{ см.}$$

Тогда сопротивление дросселя будет равно:

$$r_{др} = \frac{225 \cdot w \cdot l_м}{d^2 \cdot 10^6} = \frac{225 \cdot 3\,820 \cdot 14}{0,23^2 \cdot 10^6} = 230 \text{ ом.}$$

11. Падение напряжения на дросселе

$$U_{др} = I_0 r_{др} = 0,1 \cdot 230 = 23 \text{ в.}$$

## СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

В настоящей главе мы рассмотрим наиболее употребительные схемы стабилизаторов напряжения и тока и познакомимся с их расчетом. Из схем стабилизаторов тока мы рассмотрим схему с бареттером и схемы с электронной стабилизацией; из схем стабилизаторов напряжения будут рассмотрены схемы с газовыми стабилизаторами и с электронной стабилизацией.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ БАРЕТТЕРА

Бареттер представляет собой железную или вольфрамовую нить, помещенную в стеклянный баллон, наполненный водородом. Действие бареттера основано на том, что сопротивление металлической нити резко увеличивается при сравнительно небольшом увеличении тока через нее. Если бареттер включить последовательно в цепь, где нужно поддерживать постоянство тока (например, в цепь накала ламп бестрансформаторного приемника, фиг. 29), то при увеличении питающего напряжения падение напряжения на бареттере будет резко возрастать, а при уменьшении — резко падать, в результате чего падение напряжения на нагрузке и ток в цепи останутся почти без изменений.

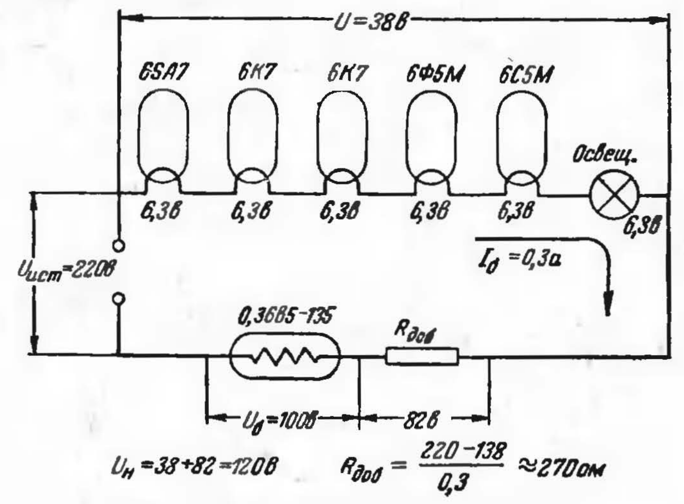
Очевидно, что схему с бареттером, поддерживающим неизменный ток в постоянном сопротивлении нагрузки, можно рассматривать как схему стабилизатора напряжения, так как напряжение на нагрузке в этом случае поддерживается неизменным.

Бареттеры могут работать как на постоянном, так и на переменном токе.



Всякий бареттер характеризуется номинальным током, который он может поддерживать, и пределами бареттирования, в которых этот ток остается почти неизменным.

На фиг. 30 приведена характеристика бареттера типа 0,85Б5,5—12, из которой видно, что пределы бареттирования составляют 5,5—12 *в*, а средний (номинальный) ток бареттирования равен 0,85 *а*.




Фиг. 29. Включение бареттера в цепь накала ламп и распределение напряжений в цепи.

Основные характеристики употребительных бареттеров даны в табл. 7.

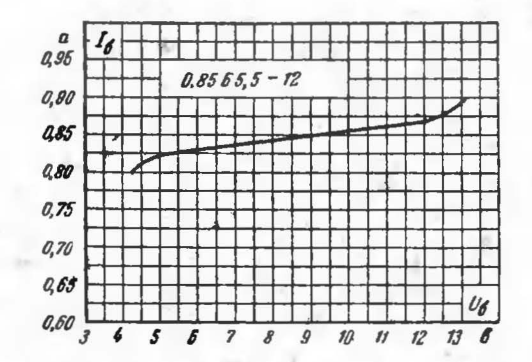
Первая цифра в обозначении бареттера указывает его номинальный ток в амперах, а вторые две цифры — пределы бареттирования в вольтах.

Бареттер может поддерживать только номинальный ток, указанный в его паспорте. Поэтому все элементы в цепи, в которую включен бареттер, должны быть рассчитаны на его номинальный ток (фиг. 29).

Если элемент, включенный последовательно с бареттером, рассчитан на ток, меньший номинального, то его нужно шунтировать сопротивлением, через которое будет течь дополнительный (до номинального) ток.

Падение напряжения на бареттере $U_б$ при номинальном напряжении питающей сети определяет рабочую точку

бареттирования. Для того чтобы правильно выбрать рабочую точку на характеристике бареттера, нужно знать величину колебаний напряжения питающей сети (источника).




Фиг. 30. Вольтамперная характеристика бареттера типа 0,85Б5,5—12.

Таблица 7

**Основные данные бареттеров**

| Параметры бареттеров | Типы бареттеров | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,24 Б12-18 | 0,3Б65-135 | 0,42 Б5,5-12 | 0,85 Б5,5-12 | 0,3Б17-35 | 1Б5-9 | 1Б10-17 |
| Напряжение нижнего предела бареттирования $U_{б.\,мин}$, *в* | 12 | 65 | 5,5 | 5,5 | 17 | 5 | 10 |
| Напряжение верхнего предела бареттирования $U_{б.\,макс}$, *в* | 18 | 135 | 12 | 12 | 35 | 9 | 17 |
| Ток нижнего предела бареттирования $I_{б.\,мин}$, *ма* | 247 | 275 | 415 | 830 | 275 | 960 | 960 |
| Ток верхнего предела бареттирования $I_{б.\,макс}$, *ма* | 263 | 325 | 435 | 870 | 325 | 1 040 | 1 040 |
| Номинальный ток бареттирования $I_б$, *ма* | 255 | 300 | 425 | 850 | 300 | 1 000 | 1 000 |
| Динамическое сопротивление $R_д$, *ом* $R_д = \frac{U_{б.\,макс} - U_{б.\,мин}}{I_{б.\,макс} - I_{б.\,мин}}$ | 375 | 1 400 | 325 | 160 | 360 | 50 | 90 |



Если обозначить через $\alpha$ — понижение напряжения сети в процентах от номинала; $\beta$ — повышение напряжения сети в процентах от номинала; $U_{б.мин}$ — напряжение нижнего предела бареттирования, *в*; $U_{б.макс}$ — напряжение верхнего предела бареттирования, *в*, то падение напряжения на бареттере $U_б$, соответствующее рабочей точке бареттирования, будет равно:

$$U_б = \frac{U_{б.макс}\,\alpha + U_{б.мин}\beta}{\alpha + \beta}. \qquad (26)$$

Нетрудно сообразить и без формулы (26), что если напряжение сети колеблется вверх и вниз на одну и ту же величину ($\alpha = \beta$), то рабочая точка будет находиться посредине между верхним и нижним пределами бареттирования.

Необходимое напряжение источника $U_{ист}$, питающего схему с бареттером, определяется как сумма напряжений на нагрузке $U_н$ и на бареттере $U_б$

$$U_{ист} = U_н + U_б.$$

При этом желательно подобрать бареттер так, чтобы напряжение на бареттере $U_б$ было бы не меньше напряжения на нагрузке $U_н$. Если напряжение источника больше этой суммы напряжений, то последовательно в цепь нужно включить соответствующее добавочное сопротивление $R_{доб}$ (фиг. 29), которое войдет в сопротивление нагрузки.

Качество стабилизации схемы с бареттером определяется величиной коэффициента стабилизации $K_б$.

Величина коэффициента стабилизации $K_б$ показывает, во сколько раз процентное изменение тока нагрузки меньше процентного изменения напряжения источника и выражается формулой

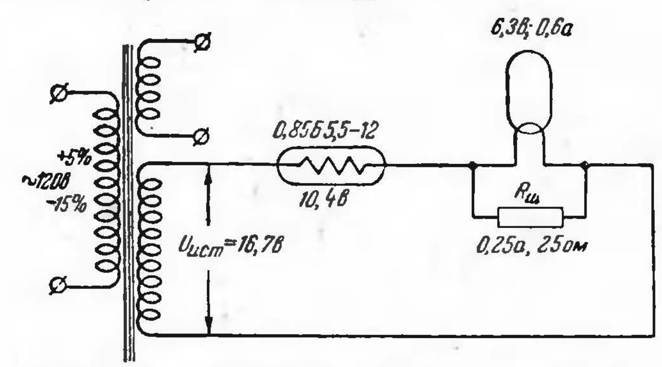
$$K_б = \frac{R_д I_б}{U_{ист}}, \qquad (27)$$

где $R_д$ — динамическое сопротивление бареттера, *ом* (значения указаны в табл. 7);

$I_б$ — номинальный ток бареттера, *а*;

$U_{ист}$ — напряжение источника, *в*.

В практике может встретиться случай, когда нужно поддерживать постоянство тока в нагрузке при неизменном напряжении питающей сети и при меняющемся сопротивлении нагрузки (например, при выключении одной из нескольких последовательно включенных ламп). В этом случае напряжение на бареттере увеличится или уменьшится как раз на столько, на сколько уменьшится или увеличится напряжение на нагрузке.




Фиг. 31. Схема включения бареттера (к примеру 21).

В заключение расчета схемы с бареттером необходимо проверить, не выходят ли крайние значения напряжений на бареттере за пределы бареттирования.

Наибольшее напряжение на бареттере, которое будет при максимальном напряжении источника, должно быть меньше или равно $U_{б.макс}$:

$$U_{ист}\left(1+\frac{\beta}{100}\right)-U_н \leqslant U_{б.макс}. \qquad (28а)$$

Наименьшее напряжение на бареттере, которое будет при минимальном напряжении источника, должно быть больше или равно $U_{б.мин}$:

$$U_{ист}\left(1-\frac{\alpha}{100}\right)-U_н \geqslant U_{б.мин}. \qquad (28б)$$

**Пример 21** (фиг. 31). Необходимо стабилизовать ток накала лампы, работающей в качестве гетеродина. Напряжение накала $U_н = 6{,}3$ *в*. Ток накала $I_н = 0{,}6$ *а*. Питание происходит от сети 120 *в* с колебаниями $+5\%$ и $-15\%$ ($\alpha = 15$; $\beta = 5$).



1. Наиболее подходящим бареттером для этой цели является бареттер 0,85 В 5,5—12, так как его среднее напряжение бареттирования (около 9 *в*) близко к напряжению на нагрузке (6,3 *в*). Так как ток нагрузки (0,6 *в*) меньше номинального тока бареттирования (0,85 *а*), то параллельно нагрузке следует включить шунтирующее сопротивление $R_ш$:

$$R_ш = \frac{U_н}{I_б - I_н} = \frac{6{,}3}{0{,}85-0{,}6} = 25 \text{ ом}.$$

2. Мощность, рассеиваемая на этом сопротивлении,

$$\frac{U_н^2}{R_ш} = \frac{6{,}3^2}{25} = 1{,}6 \text{ вт}.$$

3. Рабочая точка бареттирования определяется по формуле (26)

$$U_б = \frac{U_{б.\,макс}\alpha + U_{б.\,мин}\beta}{\alpha+\beta} = \frac{12\cdot 15 + 5{,}5\cdot 5}{15+5} = 10{,}4 \text{ в}.$$

4. Необходимо напряжение источника

$$U_{ист} = U_н + U_б = 6{,}3 + 10{,}4 = 16{,}7 \text{ в}.$$

Это напряжение нужно получить от специальной обмотки трансформатора.

5. Коэффициент стабилизации по формуле (27) равен:

$$K_б = \frac{R_д\ I_б}{U_{ист}} = \frac{160\cdot 0{,}85}{16{,}7} = 8{,}15.$$

6. Проверим наибольшее и наименьшее напряжения на бареттере при колебаниях напряжения сети по формулам (28а, 28б)

$$U_{ист}\left(1+\frac{\beta}{100}\right)-U_н = 16{,}7\left(1+\frac{5}{100}\right)-6{,}3 = 11{,}2 \text{ в} < U_{б.\,макс},$$

$$U_{ист}\left(1-\frac{\alpha}{100}\right)-U_н = 16{,}7\left(1-\frac{15}{100}\right)-6{,}3 = 7{,}9 > U_{б.\,мин}.$$

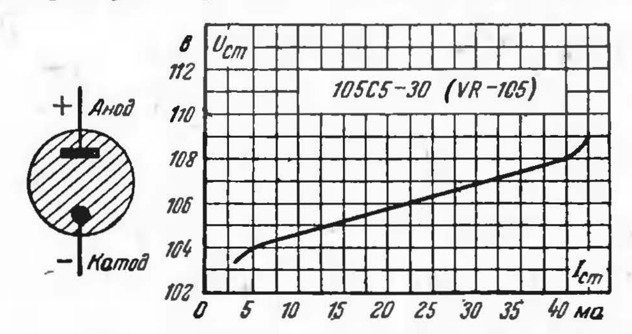
Таким образом, напряжения на бареттере не выходят за пределы бареттирования (5,5 — 12 *в*).

Если в данном примере использовать обмотку с напряжением больше расчетного (16,7 *в*) и включить добавочное сопротивление, то при этом легко можно выйти за пределы бареттирования.

## СХЕМЫ С ГАЗОВЫМИ СТАБИЛИЗАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Газовый стабилизатор напряжения или стабиловольт состоит из двух электродов (анода и холодного катода), помещенных в стеклянный баллон, наполненный инертным газом (аргоном, неоном). Катод представляет собой металлический цилиндр диаметром 15—20 *мм*, а анод имеет вид тонкого стержня, расположенного вдоль оси цилиндрического катода.

В газовых стабилизаторах используется явление тлеющего разряда между холодными электродами, при котором внутренняя поверхность цилиндрического катода начинает светиться под воздействием напряжения, приложенного между анодом и катодом. Характерное свойство ламп тлеющего разряда (стабиловольтов) заключается в том, что при изменении тока через лампу напряжение горения на ее электродах изменяется весьма незначительно. В качестве примера на фиг. 32 показана вольтамперная характеристика газового стабилизатора 105 С5-30 (R-105). Там же показано условное обозначение газового стабилизатора на схемах. Из характеристик видно, что значительные изменения тока через лампу (от 5 до 40 *ма*) вызывают лишь небольшие изменения напряжения на ее электродах (около 4 *в*).

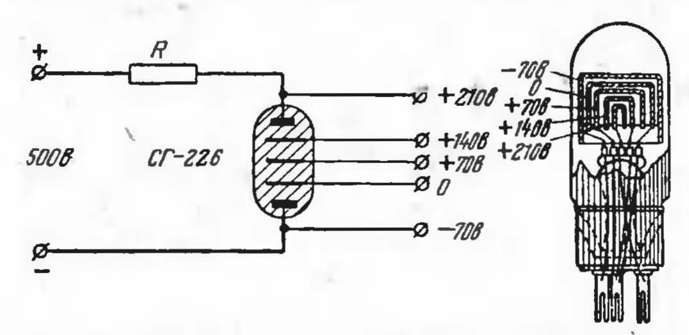



Фиг. 32. Вольтамперная характеристика газового стабилизатора 105С5-30 (VR-105) и условное обозначение газовых стабилизаторов (стабиловольтов).

Кроме газовых стабилизаторов описанной выше конструкции промышленность выпускает стабилизатор—делитель напряжения типа СГ-226. Его конструкция отличается тем, что вместо одного цилиндрического электрода (катода) в баллоне помещено несколько цилиндрических электродов, между которыми происходит разряд. Падение напряжения на каждом промежутке между электродами составляет около 70 *в*, падение напряжения на всей лампе, имеющей четыре промежутка, составляет 280 *в*. От каждого цилиндра сделан вывод на цоколь лампы, благодаря чему можно одновременно получать различные стабилизованные напряжения (фиг. 33).



Газовые стабилизаторы напряжения характеризуются величиной напряжения горения и пределами изменения тока через лампу, в которых напряжение горения остается почти постоянным.




Фиг. 33. Схема включения и устройство стабилизатора-делителя напряжения СГ-226.

Для того чтобы создать условия для возникновения тлеющего разряда, к лампе нужно приложить напряжение несколько выше напряжения горения. Это напряжение называется напряжением зажигания газового стабилизатора.

Газовые стабилизаторы работают только от источников постоянного тока. При их включении следует строго соблюдать полярность: на анод подавать плюс, а на катод— минус напряжения источника. Нельзя включать газовый стабилизатор без последовательного сопротивления, ограничивающего ток через лампу. Данные газовых стабилизаторов напряжения, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 8.

Первая цифра в обозначении газового стабилизатора указывает среднюю величину напряжения горения в вольтах, а вторые две цифры указывают допустимые пределы изменения тока через лампу в миллиамперах.

Таблица 8

**Основные данные газовых стабилизаторов**

| Параметры газовых стабилизаторов | Типы газовых стабилизаторов | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 75 С5-30 (VR-75) | 105 С5-30 (VR-105) | 150 С5-30 (VR-150) | СГ-226 (280 СД10-40) |
| Напряжение горения $U_{ст}$, *в* | 75 | 105 | 150 | 280 (70×4) |
| Напряжение зажигания $U_з$, *в* . . . . . . . . . | 105 | 127 | 180 | 450 |
| Нормальные пределы изменения тока через лампу $I_{ст}$, *ма* . . . . . . . . | 5—30 (40) | 5—30 (40) | 5—30 (40) | 10—40 (60) |
| Динамическое сопротивление $R_д$, *ом* $R_д = \frac{U_{ст.\ макс} - U_{ст.\ мин}}{I_{ст.\ макс} - I_{ст.\ мин}}$ | 240—260 | 80—120 | 160—220 | 350—450 |

Примечание. В скобках указаны максимально допустимые токи через лампы.

Простейшая схема с газовыми стабилизаторами напряжения показана на фиг. 34,*а*. Очевидно, что с помощью этой схемы можно получить стабилизованные напряжения не выше 150 *в* (применив лампу 150 С5-30). Если необходимо получить более высокое стабилизованное напряжение, то можно включить последовательно два или больше газовых стабилизаторов (фиг. 34,*б*). Например, напряжение 225 *в* можно получить, включив последовательно лампы 150 С5-30 и 75 С5-30 и т. д.

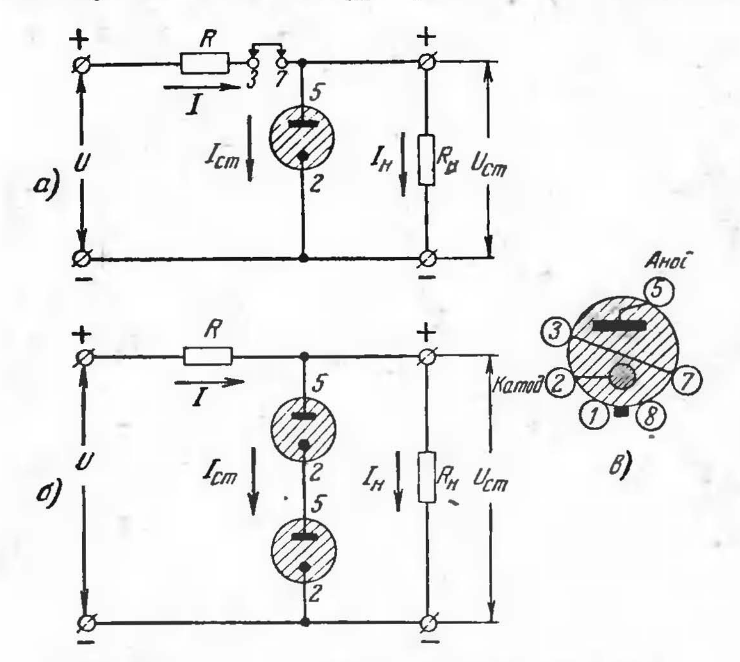
На фиг. 34,*в* показана схема цоколевки газовых стабилизаторов типа 75 С5-30, 105 С5-30 и 150 С5-30. На штырьки *3* и *7* выведена перемычка, которую обычно включают последовательно в цепь источника питания (см. точки *3* и *7* на фиг. 34, *а*). Такое включение предохраняет нагрузку от повышенного напряжения в случае, если лампа будет вынута.

Схемы стабилизаторов напряжения, изображенные на фиг. 34, поддерживают выходное напряжение $U_{ст}$ почти неизменным при изменении входного напряжения, а также при изменении тока нагрузки $I_н$. Работа схемы происходит следующим образом. Предположим, что входное напряжение $U$ увеличилось. При этом резко увеличится ток $I_{ст}$



через газовый стабилизатор, увеличится падение напряжения на сопротивлении $R$, а напряжение на выходе $U_{ст}$ останется почти неизменным. При понижении напряжения $U$ ток $I_{ст}$ резко падает, падение напряжения на $R$ уменьшается, а напряжение $U_{ст}$ опять остается почти неизменным.

Предположим теперь, что ток нагрузки $I_н$ увеличился вследствие уменьшения сопротивления нагрузки $R_н$. Это вызовет уменьшение тока $I_{ст}$ через газовый стабилизатор




Фиг. 34. Схемы стабилизаторов напряжения с лампами тлеющего разряда.

почти на ту же величину, на которую увеличился ток нагрузки $I_н$. В результате падение напряжения на сопротивлении $R$ почти не изменится, а следовательно, не изменится и напряжение $U_{ст}$ на выходе стабилизатора.

В действительности, напряжение $U_{ст}$ несколько понижается, чем и объясняется уменьшение тока через газовый стабилизатор. Однако это понижение напряжения будет

весьма незначительно и составит не более 1—3% при изменениях тока нагрузки на 30—70%.

Уменьшение тока нагрузки $I_н$ вызывает соответствующее увеличение тока через газовый стабилизатор, что опять-таки поддерживает выходное напряжение $U_{ст}$ почти неизменным.

Чем меньше ток нагрузки $I_н$ и ток через лампу $I_{ст}$ и чем больше напряжение на входе схемы $U$, тем лучше стабилизирующее действие схем фиг. 34. Однако увеличение входного напряжения $U$ более чем вдвое по сравнению с выходным напряжением $U_{ст}$ ухудшает к. п. д. схемы. С другой стороны, величина $U$ должна быть не меньше напряжения зажигания газового стабилизатора (фиг. 34,*а*) или суммы напряжений зажигания нескольких стабилизаторов (фиг. 34, *б*).

Во избежание порчи газовых стабилизаторов не следует включать схемы фиг. 34 без соответствующих нагрузок.

Коэффициент стабилизации $K$ схем фиг. 34 показывает, во сколько раз процентное изменение выходного напряжения $U_{ст}$ меньше процентного изменения входного напряжения $U$ (или напряжения сети).

$K$ нетрудно подсчитать из формулы[1]

$$K = \frac{U_{ст}(n-1)}{nR_д(I_{ст}+I_н)}; \qquad (29)$$

здесь $U_{ст}$ — выходное напряжение, *в*;

$n = U/U_{ст}$ — величина $n$ обычно берется в пределах от 1,3 до 2;

$R_д$ — динамическое сопротивление газового стабилизатора, *ом*;

$I_{ст}$ и $I_н$ — ток через лампу и ток нагрузки, *а*.

Значения $R_д$ указаны в табл. 8. Если несколько стабилизаторов включено последовательно (фиг. 34,*б*), то берется сумма динамических сопротивлений всех стабилизаторов. Очевидно, что чем меньше $R_д$, тем выше коэффициент стабилизации.

[1] Вывод этой формулы дан в статье автора „Расчет стабилизатора напряжения с лампами тлеющего разряда", „Вестник связи" (выпуск—Техника связи), 1949 г., № 11.



Ток через лампу $I_{ст}$ рекомендуется выбирать в пределах от 10 до 20 *ма* в зависимости от заданных колебаний входного напряжения $U$: чем меньше колебания входного напряжения, тем меньше можно выбрать $I_{ст}$.

Зная входное напряжение $U$ и токи $I_{ст}$ и $I_н$, можно легко найти величину сопротивления $R$:

$$R = \frac{U - U_{ст}}{I_{ст} + I_н} = \frac{U_{ст}(n-1)}{I_{ст} + I_н}. \qquad (30)$$

При расчете схем фиг. 34 необходимо проверить, не выходят ли крайние значения токов через газовый стабилизатор за пределы допустимых токов для данного типа лампы.

Максимальный ток через лампу при максимальном входном напряжении будет:

$$I_{ст.\,макс} = I_{ст} + \frac{U}{R} \cdot \frac{\beta}{100}. \qquad (31а)$$

Минимальный ток при минимальном входном напряжении будет:

$$I_{ст.\,мин} = I_{ст} - \frac{U}{R} \cdot \frac{\alpha}{100}; \qquad (31б)$$

В формулах (31а) и (31б)

$I_{ст}$ — ток через лампу при номинальном входном напряжении, *а*;

$U$ — номинальное входное напряжение, *в*;

$R$ — сопротивление в схеме стабилизатора, *ом* [формула (30)];

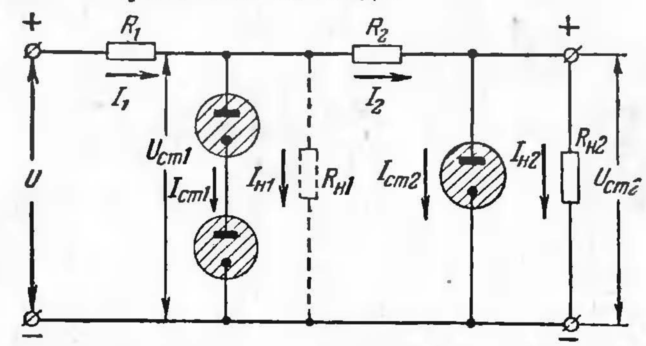
$\alpha$ — понижение напряжения $U$ (или сети) в процентах от номинала;

$\beta$ — повышение напряжения $U$ (или сети) в процентах от номинала.

Проверив значения максимального и минимального токов, можно сказать, правильно ли выбран ток $I_{ст}$ через лампу при номинальном входном напряжении.

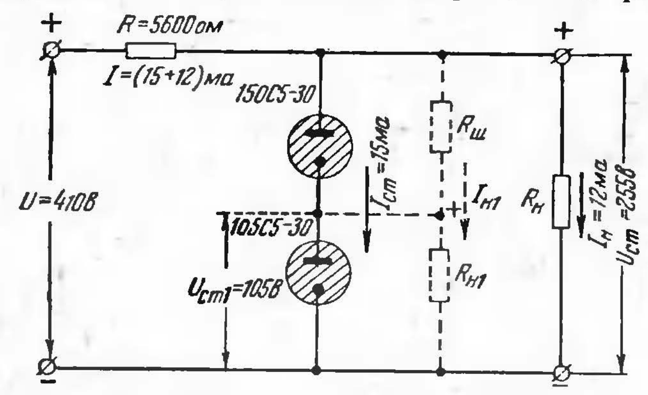
Схемы фиг. 34 пригодны для стабилизации при токах нагрузки не выше 25—30 *ма*. Дальнейшее увеличение тока нагрузки быстро снижает коэффициент стабилизации $K$, который обычно лежит в пределах от 8 до 20.

Следует всегда иметь в виду, что схемы стабилизаторов обладают свойствами сглаживающих фильтров. Пульсация на выходе схемы уменьшается примерно в $K$ раз по сравнению с пульсацией на входе.




Фиг. 35. Каскадная схема стабилизатора напряжения.

Для увеличения коэффициента стабилизации $K$ иногда применяют так называемую каскадную схему стабилизации, состоящую из двух последовательно включенных схем по типу фиг. 34. Каскадная схема изображена на фиг. 35.




Фиг. 36. Схема стабилизатора напряжения (к примеру 22). Пунктиром показана схема включения дополнительной нагрузки.

Ясно, что выходное напряжение первой схемы $U_{cm\,1}$ должно быть больше выходного напряжения второй схемы $U_{cm\,2}$. При этом вовсе не обязательно включать в первую схему два газовых стабилизатора, как это показано на фиг. 35.



Так, например, в первую схему может быть включен стабилизатор типа 150 С5-30, а во вторую схему—стабилизатор типа 105 С5-30 или 75 С5-30.

Если ток нагрузки $I_{н\,2}$ второй схемы невелик, то одновременно с использованием высокостабильного напряжения $U_{cm\,2}$ можно использовать менее стабильное напряжение $U_{cm\,1}$, как это показано на фиг. 35 пунктиром.

Коэффициент стабилизации каскадной схемы равен произведению коэффициентов стабилизации первой и второй схем: $K = K_1 \cdot K_2$.

Расчет каждой схемы в отдельности производится по вышеприведенным формулам. При этом для второй схемы входным напряжением будет практически постоянное напряжение $U_{cm\,1}$, а полный ток нагрузки для первой схемы будет равен:

$$I_н = I_{н\,1} + I_{cm2} + I_{н\,2}.$$

В качестве примера проделаем расчет схемы стабилизатора.

**Пример 22.** Требуется рассчитать стабилизатор напряжения на 255 *в* при токе нагрузки 12 *ма*. Выпрямитель, питающий схему стабилизатора, работает от сети переменного напряжения, которое колеблется в пределах ±10%.

1. Величина тока нагрузки $I_н = 12$ *ма* позволяет применить схему с газовыми стабилизаторами напряжения 150 С5-30 и 105 С5-30, включенными последовательно (фиг. 36).

2. Найдем коэффициент стабилизации схемы.

Для этого выберем величину $n$, показывающую отношение входного напряжения к выходному и ток $I_{cm}$ через газовый стабилизатор при номинальном напряжении питающей сети

$$n = 1{,}6 \quad I_{cm} = 15 \text{ ма}.$$

Из табл. 8 находим, что динамическое сопротивление лампы 150 С5-30 $R_д = 200$ *ом*, а динамическое сопротивление лампы 105 С5-30 $R_д = 100$ *ом*.

Тогда коэффициент стабилизации схемы будет равен [формула (29)]:

$$K = \frac{U_{cm}(n-1)}{nR_д\,(I_{cm} + I_н)} = \frac{255\,(1{,}6-1)}{1{,}6\,(200+100)\,(15+12)\,10^{-3}} = 11{,}8.$$

На основании полученного значения $K$ можно сказать, что при изменении напряжения сети (или входного напряжения $U$), например на 5%, напряжение на выходе изменится на $5/11{,}8 = 0{,}42\%$. Если эта

величина почему-либо не удовлетворяет требованиям качества стабилизации, то $K$ можно немного повысить, увеличив величину $n$.

3. По формуле (30) определяем величину $R$:

$$R = \frac{U_{cm}(n-1)}{I_{cm}+I_н} = \frac{255(1,6-1)}{(15+12)\,10^{-3}} \approx 5\,600 \ ом.$$

Мощность, рассеиваемая на сопротивлении $R$:

$$P_R = I^2R = [(15+12)\,10^{-3}]^2 5\,600 = 4,1 \ вт.$$

4. Необходимое входное напряжение $U$:

$$U = nU_{cm} = 1,6 \cdot 255 \approx 410 \ в.$$

Это напряжение (410 *в*) должно быть получено от выпрямителя, питающего схему стабилизатора.

5. Проверим пределы изменения тока через газовые стабилизаторы по формулам (31а) и (31б).

Из задания известно, что процентные изменения напряжения сети равны:

$$\alpha = \beta = 10;$$

следовательно,

$$I_{cm.\,макс} = I_{cm} + \frac{U}{R}\frac{\beta}{100} = 15 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ \frac{410}{5\,600} \cdot \frac{10}{100} = 22,3 \cdot 10^{-3} a = 22,3 \ ма;$$

$$I_{cm.\,мин} = I_{cm} - \frac{U\alpha}{R \cdot 100} = 15 \cdot 10^{-3} -$$

$$- \frac{410}{5\,600} \cdot \frac{10}{100} = 7,7 \cdot 10^{-3} a = 7,7 \ ма.$$

Таким образом, изменения тока через газовые стабилизаторы не выходят за допустимые пределы (5—30 *ма*, табл. 8). Если бы величина максимального или минимального тока через лампы выходила за допустимые пределы, то нужно было бы выбрать другое значение тока $I_{cm}$: если $I_{cm.\,макс}$ больше $30-40$ *ма*, то $I_{cm}$ следует уменьшить; если $I_{cm.\,мин}$ меньше $5-6$ *ма*, то $I_{cm}$ следует увеличить. Ограничить изменение тока через газовые стабилизаторы можно также, задавшись меньшими изменениями напряжения питающей сети ($\alpha$ и $\beta$).

В случае необходимости можно использовать выбранную схему фиг. 36 для получения двух стабилизованных напряжений одновременно ($U_{cm}$ и $U_{cm\,1}$). Величина дополнительного напряжения $U_{cm1}$ в нашем примере может быть равна +150 *в* либо +105 *в* в зависимости от того, который из двух газовых стабилизаторов будет подключен к общему минусу стабилизованных напряжений. Для того чтобы через оба газовых стабилизатора протекал один и тот же ток $I_{cm}$, параллельно верхней лампе следует включить сопротивление $R_ш$, через которое будет протекать ток дополнительной нагрузки $I_{н1}$ (см. пунктир на фиг. 36). Расчет схемы стабилизатора в этом случае следует вести на суммарный ток нагрузки $I_н + I_{н1}$. Схема фиг. 36 будет отличаться от схемы с обычным делителем напряжения (потенциометром) тем, что при изменении тока через дополнительную нагрузку $I_{н1}$ напряжение на ней будет поддерживаться неизменным.



## ЭЛЕКТРОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Электронные стабилизаторы напряжения являются наиболее совершенными схемами стабилизаторов. Они применяются как в промышленных, так и в лабораторных устройствах. Коэффициент стабилизации этих схем $K$ легко сделать значительно выше, чем у схем с бареттерами или с газовыми стабилизаторами. Значение коэффициента стабилизации у электронных стабилизаторов колеблется от $K = 50$ до $K = 1\,000$.

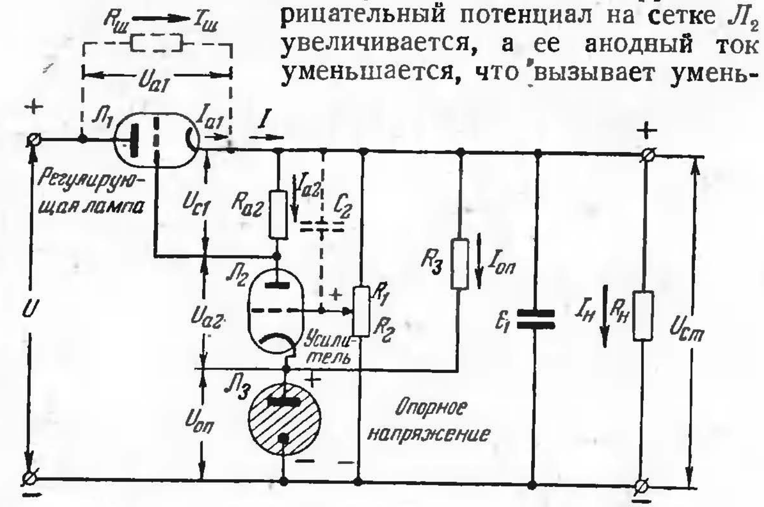
Величина тока нагрузки в схемах с электронной стабилизацией принципиально не ограничена. Существует довольно много разновидностей схем с электронной стабилизацией напряжения. Здесь мы рассмотрим только две основные и наиболее часто встречающиеся схемы стабилизаторов с последовательно включенной регулирующей лампой.

Первая из этих схем представлена на фиг. 37. Схема состоит из регулирующей лампы $Л_1$, усилителя постоянного тока на лампе $Л_2$, газового стабилизатора $Л_3$, служащего в качестве источника опорного напряжения $U_{оп}$, и делителя напряжения, состоящего из сопротивлений $R_1$ и $R_2$. Сопротивление $R_3$ служит для ограничения тока через газовый стабилизатор $Л_3$.

Рассмотрим работу схемы фиг. 37. Предположим, что напряжение на входе стабилизатора $U$ увеличилось вследствие увеличения напряжения питающей сети или из-за уменьшения тока нагрузки $I_н$. При этом напряжение на выходе стабилизатора должно несколько возрасти, что уменьшит отрицательный потенциал на сетке усилительной лампы $Л_2$. Анодный ток лампы $Л_2$, проходящий через сопротивление $R_{a2}$, увеличится и вызовет увеличение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$. Это в свою очередь вызовет повышение сопротивле-

ния регулирующей лампы для протекающего через нее тока и увеличит паденне напряжения на ней. Падение напряжения на регулирующей лампе увеличится почти настолько, насколько увеличилось входное напряжение $U$. В результате напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст}$ почти не изменится.

При уменьшении входного напряжения $U$ из-за уменьшения напряжения сети или увеличения тока нагрузки отрицательный потенциал на сетке $Л_2$ увеличивается, а ее анодный ток уменьшается, что вызывает уменьшение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$. Сопротивление регулирующей лампы падает, и падение напряжения на ней уменьшается на величину, почти равную уменьшению входного напряжения $U$. В результате выходное напряжение $U_{ст}$ останется почти без изменений.




Фиг. 37. Схема электронного стабилизатора напряжения.

Таким образом, регулирующая лампа $Л_1$, включенная последовательно с нагрузкой, выполняет роль переменного сопротивления, величина которого изменяется в зависимости от входного напряжения и тока нагрузки.

Через регулирующую лампу проходит весь ток стабилизатора $I$, состоящий в основном из тока нагрузки $I_н$ и тока через газовый стабилизатор $Л_3$ (током через лампу $Л_2$ и через делитель $R_1R_2$ обычно можно пренебречь). При



этом мощность рассеяния на аноде регулирующей лампы не должна превышать допустимой для данной лампы величины.

В качестве регулирующих ламп обычно применяются мощные триоды 2А3, У0-186 или тетроды и пентоды в триодном соединении, как, например, 6V6, 6Ф6, 6П3, Г-807, Г-411, П-50 (LS-50). Внутреннее сопротивление регулирующей лампы должно быть минимальным. Поэтому тетроды и пентоды используются обычно только в триодном соединении, что значительно уменьшает их внутреннее сопротивление.

Часто для уменьшения мощности рассеяния на аноде регулирующей лампы параллельно ей включают шунтирующее сопротивление $R_ш$, через которое протекает от 20 до 50% общего тока $I$ стабилизатора (см. пунктир на фиг. 37). Следует иметь в виду, что включение шунтирующего сопротивления несколько снижает коэффициент стабилизации схемы (в 1,3—1,5 раза). Если включение $R_ш$ недостаточно снижает мощность рассеяния на аноде лампы, то следует включить несколько регулирующих ламп параллельно. Сопротивление $R_ш$ при этом может оказаться ненужным.

Регулирующая лампа должна работать только при отрицательном смещении на управляющей сетке. При появлении токов сетки работа стабилизатора резко нарушается. Падение напряжения $U_{a1}$ на регулирующей лампе составляет обычно от 100 до 250 *в* в зависимости от типа лампы и от величины входного напряжения $U$. Очевидно, что чем меньше падение напряжения, тем выше к. п. д. схемы стабилизатора. Однако уменьшать $U_{a1}$ можно только до такой величины, при которой смещение на сетке регулирующей лампы при заданном максимальном токе через нее будет еще оставаться отрицательным:

$$U_{c1} = -(1 \div 3)\ в.$$

**Пример. 23.** Требуется выбрать регулирующую лампу для стабилизатора напряжения с общим током нагрузки $I = 80$ *ма*; определить минимально допустимое паденне напряжения на лампе $U_{a1}$; рассчитать шунтирующее сопротивление $R_ш$, если оно окажется необходимым.

Для данного тока нагрузки чаще всего применяют лучевой тетрод 6П3 в триодном соединении (сетка $c_2$ соединена с анодом); анодные характеристики тетрода 6П3 при триодном включении пред-

ставлены на фиг. 38. Из этих характеристик находим, что минимально допустимое анодное напряжение $U_{a1}$ при токе 80 *ма* составляет 150 *в*. При этом анодном напряжении отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы $U_{c1} = -1$ *в*. Дальнейшее уменьшение анодного напряжения приведет к недопустимому уменьшению отрицательного смещения. Однако, мощность рассеяния на аноде при напряжении $U_{a1} = 150$ *в* составляет: $P_{a1} = U_{a1} I = 150 \cdot 0{,}08 = 12$ *вт*, а для лампы 6П3 в триодном режиме допустимо рассеивать на аноде всего лишь 10 *вт*. Поэтому целесообразно часть тока (например, 30 *ма*) пропустить через шунтирующее сопротивление $R_ш$. Тогда




Фиг. 38. Анодные характеристики тетрода 6П3 при триодном включении.

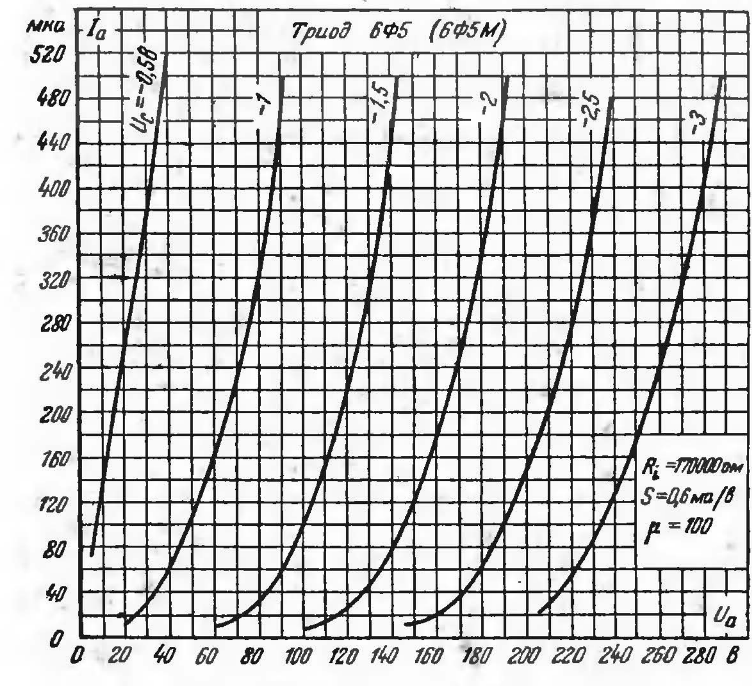
через лампу будет проходить ток $I_{a1} = I - I_ш = 80 - 30 = 50$ *ма*. Минимальное напряжение на аноде можно при этом принять: $U_{a1} = 125$ *в*. Из семейства анодных характеристик (фиг. 38) находим, что при $I_{a1} = 50$ *ма* и $U_{a1} = 125$ *в*, смещение $U_{c1} = -3$ *в*, что допустимо. Мощность рассеяния на аноде составит:

$$P_{a1} = 125 \cdot 0{,}05 = 6{,}25 \text{ вт} < 10 \text{ вт}.$$

Сопротивление шунта (см. схему фиг. 37) будет:

$$R_ш = \frac{U_{a1}}{I_ш} = \frac{125}{0{,}03} = 4\,200 \text{ ом}.$$

Каскад усиления постоянного тока на лампе $Л_2$ усиливает изменения постоянного напряжения на выходе стабилизатора и подает их на сетку регулирующей лампы $Л_1$. Чем больше коэффициент усиления этого каскада, тем выше будет коэффициент стабилизации схемы. Очевидно, что чем больше сопротивление анодной нагрузки $R_{a2}$ усилителя, тем выше коэффициент усиления каскада. Величину сопротивления анодной нагрузки $R_{a2}$ выбирают в 2—5 раз больше величины внутреннего сопротивления усилительной лампы $R_{i2}$. Анодный ток $I_{a2}$ усилительной лампы $Л_2$ составляет обычно несколько десятков или сотен микроампер. Сопротивление $R_{a2}$ желательно выбирать с таким




Фиг. 39. Анодные характеристики триода 6Ф5.

расчетом, чтобы минимальный анодный ток $I_{a2}$ был не ниже 10—20 *мка*, а отрицательное смещение на сетке—не менее 0,5—1 *в*. В качестве усилительных ламп применяются триоды с большим коэффициентом усиления, например 6Ф5, 6Г7, 6Н9М, 6Н8М, 6С5 или пентоды 6Ж7, 6К7 и др.

Следует иметь в виду, что питание накалов усилительной и регулирующей ламп следует производить от разных

обмоток, так как межлу катодами этих ламп в схеме стабилизатора существует большая разность потенциалов, доходящая до 150 и более вольт.

**Пример 24.** Выбрать анодное сопротивление $R_{a2}$ каскада усилителя постоянного тока на лампе 6Ф5; определить величину анодного тока $I_{a2}$ и необходимое смещение на сетке $U_{c2}$. Известно, что анодное напряжение на лампе усилителя $U_{a2} = 120$ *в*, а смещение на сетке регулирующей лампы $U_{c1} = -20$ *в*.

Из семейства анодных характеристик лампы 6Ф5 (фиг. 39) находим величину внутреннего сопротивления: $R_{i2} = 170\,000$ *ом*. Выбираем величину анодного сопротивления: $R_{a2} = 3R_{i2} = 3 \cdot 170\,000 \approx 500\,000$ *ом*.

Величину анодного тока $I_{a2}$ можно определить, зная падение напряжения на анодном сопротивлении и величину этого сопротивления.

Из схемы фиг. 37 ясно, что падение напряжения на анодном сопротивлениии численно равно смещению $U_{c1}$ на сетке регулирующей лампы. Поэтому анодный ток через лампу будет равен:

$$I_{a2} = \frac{|U_{c1}|}{R_{a2}} = \frac{20}{500\,000} = 40 \cdot 10^{-6} a = 40 \text{ мка}.$$

Обозначение $|U_{c1}|$ показывает, что величину $U_{c1}$ следует брать при расчете без учета знака (в данном случае—минуса).

Из анодных характеристик лампы (фиг. 39) находим, что при $U_{a2} = 120$ *в* и $I_{a2} = 40$ *мка* смещение на сетке должно быть: $U_{c2} = -1{,}9$ *в*, что вполне приемлемо.

В схемах электронных стабилизаторов газовый стабилизатор $Л_3$ служит не в качестве стабилизатора напряжения, как в схемах фиг. 34, а в качестве источника стабильного напряжения, называемого „опорным", относительно которого изменяется потенциал сетки усилительной лампы $Л_2$. Так как в данном случае газовый стабилизатор выполняет только роль источника напряжения, то в некоторых схемах электронных стабилизаторов он заменяется сухой батареей, дающей более стабильное напряжение.

Опорное напряжение $U_{оп}$ включено навстречу напряжению, падающему на сопротивлении $R_2$ делителя (фиг. 37), что обеспечивает необходимое отрицательное смещение на сетке усилительной лампы $Л_2$ (около 1—3 *в*).

Чем больше величина опорного напряжения, тем лучше стабилизирующее действие схемы.

Однако величину $U_{оп}$ надо выбрать так, чтобы анодное напряжение $U_{a2}$ лампы усилителя было бы не меньше



требуемого для ее нормальной работы. В качестве источников опорного напряжения обычно используют газовые стабилизаторы типов 150С5-30, 105С5-30 и 75С5-30.

Расчет сопротивления $R_3$, ограничивающего ток через газовый стабилизатор $Л_3$ (фиг. 37), не представляет трудностей: напряжение на нем равно разности между выходным напряжением $U_{ст}$ и опорным напряжением $U_{оп}$, а ток $I_{оп}$ через стабилизатор выбирается от 8 до 12 *ма*. Отсюда величина сопротивления

$$R_3 = \frac{U_{ст} - U_{оп}}{I_{оп}}. \tag{32}$$

Сопротивление $R_2$ плеча делителя можно определить из формулы

$$R_2 = \frac{U_{оп}}{U_{ст}} \cdot (R_1 + R_2). \tag{33}$$

Полное сопротивление делителя $R_1 + R_2$ выбирают из расчета, чтобы ток через делитель не превышал 1—2 *ма*. Желательно, чтобы делитель был выполнен в виде потенциометра. Это даст возможность точнее установить величину требуемого выходного напряжения.

**Пример 25.** Выбрать газовый стабилизатор и рассчитать величину сопротивления $R_3$ и делителя $R_1R_2$ для схемы электронного стабилизатора с выходным напряжением $U_{ст} = 200$ *в*. Минимально допустимое анодное напряжение усилительной лампы $Л_2$: $U_{a2} = 60$ *в*, напряжение смещения на сетке регулирующей лампы $U_{c1} = -20$ *в*.

1. Из схемы фиг. 37 следует, что опорное напряжение при указанных выше условиях должно быть не более

$$U_{оп} = U_{ст} - (U_{a2} + |U_{c1}|) = 200 - (60 + 20) = 120 \text{ в}.$$

Так как газового стабилизатора на 120 *в* не существует, то выбираем лампу 105С5-30, имеющую ближайшее меньшее напряжение горения (на аноде $Л_2$ будет при этом на 15 *в* больше; $U_{a2} = 75$ *в*).

2. Ток через газовый стабилизатор выбираем $I_{оп} = 10$ *ма*. Тогда сопротивление $R_3$ по формуле (32) будет равно:

$$R_3 = \frac{U_{ст} - U_{оп}}{I_{оп}} = \frac{200 - 105}{10 \cdot 10^{-3}} \approx 10\,000 \text{ ом}.$$

3. Сопротивление делителя $R_1R_2$ определяем, полагая ток через делитель равным 1 *ма.*

Тогда

$$R_1+R_2=\frac{U_{cm}}{1\cdot 10^{-3}}=\frac{200}{1\cdot 10^{-3}}=200\,000\ \text{ом}.$$

Сопротивление $R_2$ определяем по формуле (33):

$$\frac{U_{on}}{U_{cm}}\cdot(R_1+R_2)=\frac{105}{200}\cdot 200\,000\approx 100\,000\ \text{ом}.$$

Следовательно,

$$R_1=200\,000-100\,000=100\,000\ \text{ом}.$$

Конденсатор $C_1$, включенный на выходе стабилизатора (фиг. 37), служит для увеличения устойчивости работы схемы. При непродуманном монтаже схема электронного стабилизатора склонна к самовозбуждению, так как в нее входит усилитель с довольно большим коэффициентом усиления. Включение конденсатора $C_1$ емкостью 2—4 *мкф* устраняет это неприятное явление.

Схема электронного стабилизатора одновременно является хорошим сглаживающим фильтром. Действительно, если схема стабилизатора поддерживает выходное напряжение постоянным при медленных изменениях входного напряжения, то очевидно, что она будет поддерживать выходное напряжение неизменным и при быстрых колебаниях входного напряжения, так как схема стабилизатора практически безинерционна.

Пульсацию же выпрямленного напряжения можно рассматривать, как быстрые изменения входного напряжения $U$ с частотой удвоенной или равной частоте питающей сети. Пульсация выпрямленного напряжения на выходе стабилизатора ослабляется в $K$ раз по сравнению с пульсацией на входе ($K$— коэффициент стабилизации). Пульсация ослабляется приблизительно в $2K$ раз, если между плюсом выходного напряжения и сеткой усилительной лампы $Л_2$ (фиг. 37) включить конденсатор $C_2$, показанный пунктиром. Величина емкости этого конденсатора берется обычно в пределах 0,1—0,3 *мкф.*

Коэффициент стабилизации электронного стабилизатора можно подсчитать по приближенной формуле

$$K=\frac{U_{on}}{U_{cm}}\cdot\mu K_y\ \frac{R_{ш}}{R_{ш}+R_{i1}},\qquad(34)$$



где $\mu$ — коэффициент усиления регулирующей лампы;

$K_y$ — коэффициент усиления усилителя постоянного тока;

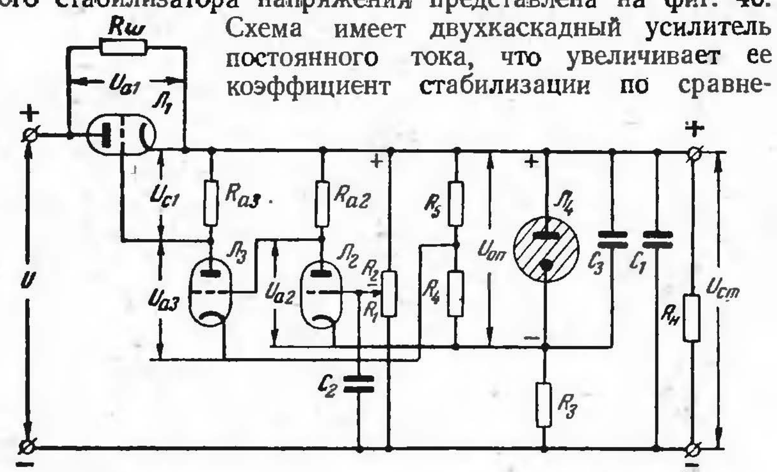
$R_{i1}$ — внутреннее сопротивление регулирующей лампы (или ламп), *ом.*

Коэффициент стабилизации $K$ показывает, во сколько раз изменения выходного напряжения $U_{cm}$ меньше изменений входного напряжения $U$.

Иногда интересно знать величину внутреннего сопротивления стабилизатора $Z_i$. Чем меньше величина внутреннего сопротивления, тем меньше будет изменяться выходное напряжение $U_{cm}$ при изменении тока нагрузки $I_н$. В электронных стабилизаторах величина $Z_i$ лежит в пределах от нескольких единиц до нескольких десятков ом. Значения $Z_i$ можно найти из формулы

$$Z_i=\frac{R_{i1}}{K}.\qquad(35)$$

**В т о р а я, ч а с т о п р и м е н я е м а я с х е м а** электронного стабилизатора напряжения представлена на фиг. 40. Схема имеет двухкаскадный усилитель постоянного тока, что увеличивает ее коэффициент стабилизации по сравнению со схемой фиг. 37, имеющей однокаскадный усилитель.




Фиг. 40. Схема электронного стабилизатора напряжения с двухкаскадным усилителем постоянного тока.

Для нормальной работы схемы (фиг. 40) фаза напряжения, подаваемого на сетку первого каскада усилителя, должна быть противоположна фазе напряжения, подаваемого на

сетку усилителя в схеме фиг. 37. Из рассмотрения работы схемы фиг. 37 мы знаем, что, например, при увеличении входного напряжения отрицательное смещение на сетке усилительной лампы уменьшается. Однокаскадный усилитель поворачивает фазу напряжения на 180°, в результате чего отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы увеличивается; это и требуется при повышении входного напряжения. В схеме фиг. 40 при повышении входного напряжения отрицательное смещение на сетке первого каскада должно увеличиться, а не уменьшиться, как в схеме фиг. 37, так как двухкаскадный усилитель поворачивает фазу на 360°. При этом отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы также увеличится, что будет соответствовать правильной работе схемы при повышении входного напряжения. Нужное изменение фазы напряжения, подаваемого на сетку усилителя, достигается соответствующей схемой включения опорного напряжения ($Л_4$).

Разберем подробнее работу схемы фиг. 40. Предположим, что увеличилось входное напряжение $U$. При этом возрастает падение напряжения на сопротивлении делителя $R_2$. Смещение на сетке первого каскада усилителя $Л_2$, которое представляет собой разность между напряжением на $R_2$ и опорным напряжением $U_{оп}$, станет более отрицательным. Анодный ток первого каскада и падение напряжения на анодном сопротивлении $R_{a2}$ уменьшатся, вследствие чего анод первого каскада станет более положительным. Это вызовет уменьшение отрицательного потенциала сетки второго каскада усилителя $Л_3$. Анодный ток второго каскада и падение напряжения на сопротивлении $R_{a3}$ увеличатся, что вызовет увеличение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$. Сопротивление регулирующей лампы повысится, падение напряжения на ней возрастет, а напряжение $U_{ст}$ на выходе схемы останется почти без изменений. Легко проследить, что при уменьшении входного напряжения $U$ сопротивление регулирующей лампы будет уменьшаться.

С помощью сопротивлений $R_4$ и $R_5$ устанавливаются необходимые анодные напряжения на лампах $Л_2$ и $Л_3$:

$$U_{a2}=U_{оп}\frac{R_4}{R_4+R_5}; \qquad (36а)$$

$$U_{a3}=U_{оп}\frac{R_5}{R_4+R_5}-|U_{c1}|. \qquad (36б)$$



Анодные токи ламп $Л_2$ и $Л_3$ соответственно равны:

$$I_{a2}=\frac{U_{a3}+|U_{c1}|}{R_{a2}}; \qquad (37а)$$

$$I_{a3}=\frac{|U_{c1}|}{R_{a3}}. \qquad (37б)$$

В качестве усилительных ламп $Л_2$ и $Л_3$ удобно применять двойные триоды с разделенными катодами, например 6Н9М, 6Н8М.

Ток, протекающий через сопротивления $R_4$ и $R_5$, выбирается в пределах 3—5 *ма*. Ток через газовый стабилизатор $Л_4$ обычно равен 8—12 *ма*. Сопротивление $R_3$ рассчитывается на суммарный ток лампы $Л_4$ и ток через $R_4$ и $R_5$. Напряжение на сопротивлении $R_3$ равно $U_{ст}-U_{оп}$.

Конденсаторы $C_1$ (2—4 *мкф*) и $C_3$ (0,1—0,3 *мкф*) служат для устранения возможности самовозбуждения схемы. Конденсатор $C_2$ (0,1—0,3 *мкф*) служит для уменьшения пульсации выходного напряжения. Остальные элементы схемы фиг. 40 выбираются из тех же соображений, что в схеме фиг. 37.

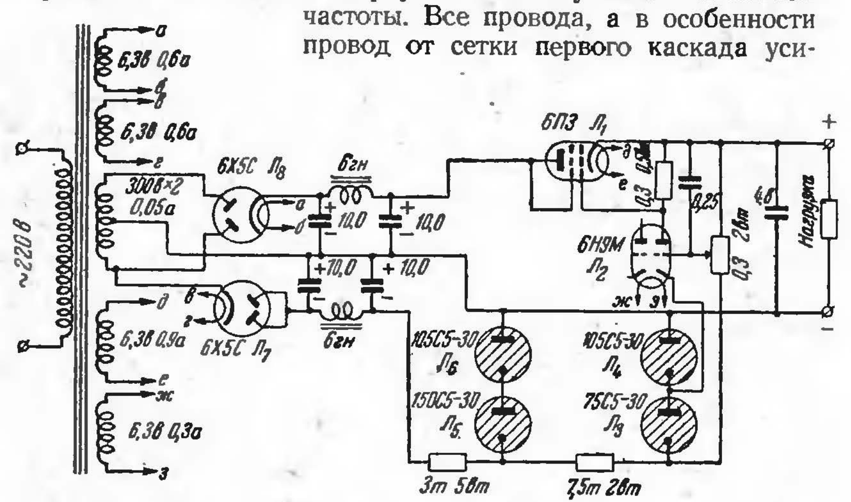
Коэффициент стабилизации $K$ и внутреннее сопротивление стабилизатора $Z_i$ определяются по ранее приведенным формулам (34) и (35). Схема с двумя каскадами усиления даст весьма высокий коэффициент стабилизации (1 000 и выше). Схемы стабилизаторов с бо́льшим числом каскадов усиления почти не применяются.

Мы рассмотрели две основные и наиболее часто применяемые схемы электронных стабилизаторов напряжения. Эти схемы предназначены для стабилизации напряжений от 120—150 до 600—800 *в*.

Для стабилизации более низких напряжений применяются подобные же схемы, но отличающиеся от описанных наличием некоторых дополнительных элементов. Одна из таких схем показана на фиг. 41. Эта схема имеет вспомогательный однополупериодный выпрямитель на кенотроне $Л_7$, который питает источник опорного напряжения, состоящий из каскадной схемы стабилизации (фиг. 35) с газовыми стабилизаторами $Л_3$, $Л_4$, $Л_5$ и $Л_6$. Схема фиг. 41 позволяет получать стабилизованные напряжения почти от нуля до 150 *в* при токе около 30 *ма*. Изменение выходного напряжения производится регулировкой смещения на сетке усилительной

лампы $Л_2$ с помощью потенциометра сопротивлением 0,3 *мгом*. В качестве усилительной лампы использована правая половина двойного триода 6Н9М. Левая половина лампы может быть использована для других схем, не связанных со схемой стабилизатора. Данные деталей указаны на схеме [1].

Сборка и монтаж схем электронных стабилизаторов напряжения напоминает сборку и монтаж усилителей низкой частоты. Все провода, а в особенности провод от сетки первого каскада уси-




Фиг. 41. Схема электронного стабилизатора с низким выходным напряжением. Напряжение регулируется в пределах 0—150 *в*. Максимальный ток 30 *ма*.

лителя к делителю $R_1R_2$, должны быть, по возможности, короче. При параллельном включении двух и более регулирующих ламп в цепь анода каждой из них (и в цепь экранной сетки тетродов и пентодов) следует включать антипаразитные сопротивления величиной 50—100 *ом*. Греющиеся детали (регулирующие лампы, шунтирующие сопротивления) следует располагать как можно дальше от конденсаторов.

Если стабилизатор правильно рассчитан и аккуратно собран, то налаживание его не представляет особого труда. Для настройки стабилизатора нужно на выход его включить вольтметр и, медленно поворачивая ручку потенциометра делителя $R_1$ $R_2$, установить по вольтметру нужное напряжение. Если, наблюдая некоторое время за стрелкой вольтметра, можно заметить, что она стоит неподвижно, то это указывает на нормальную работу стабилизатора. В случае, если напряжение на выходе не равно расчетному или колеблется, следует в первую очередь проверить величину входного напряжения и величину падения напряжения на регулирующей лампе. Эти напряжения должны полностью соответствовать расчетным значениям (см. следующую главу). Далее, надо убедиться, что газовый стабилизатор зажегся. Наконец, надо попробовать увеличить емкость $C_1$ на выходе стабилизатора на 2—3 *мкф*. Никогда не следует включать электронный стабилизатор без нагрузки. Это может привести к выходу из строя газового стабилизатора или ограничивающего сопротивления $R_3$.

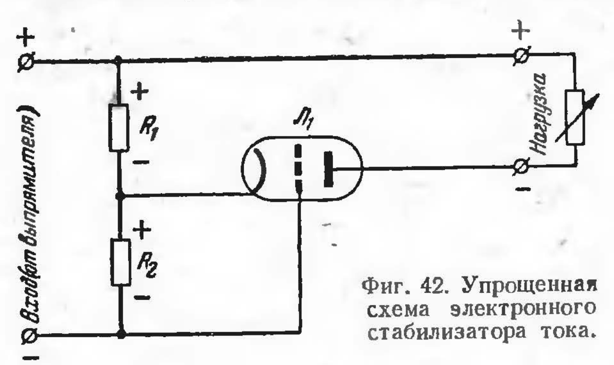
Перечисленными выше причинами чаще всего объясняются неисправности в электронных стабилизаторах напряжения.

Пример полного расчета электронного стабилизатора напряжения будет дан ниже.

[1] Эта схема подробно описана автором в журнале „Автоматика и телемеханика", 1951, № 1.

## ЭЛЕКТРОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ ТОКА

Как было отмечено ранее, стабилизаторы тока применяются значительно реже стабилизаторов напряжения. Тем




Фиг. 42. Упрощенная схема электронного стабилизатора тока.

не менее, полезно будет познакомиться с некоторыми простейшими схемами стабилизаторов тока.

Принцип действия стабилизатора тока можно уяснить из упрощенной схемы фиг. 42, которая иногда называется мостовой схемой с обратной связью. Эта схема поддерживает неизменный ток в нагрузке как при изменениях входного на-

пряжения, так и при изменениях сопротивления нагрузки, включенной последовательно с регулирующей лампой $Л_1$.

Предположим, что входное напряжение повысилось. Тогда соответственно увеличится падение напряжения на сопротивлениях $R_1$ и $R_2$. Это вызовет одновременное увеличение анодного напряжения регулирующей лампы $Л_1$ за счет увеличения падения напряжения на сопротивлении $R_1$ и увеличение отрицательного смещения на ее сетке за счет увеличения падения напряжения на сопротивлении $R_2$.

Для того чтобы сила анодного тока, а следовательно, и сила тока в нагрузке оставались без изменений, необходимо увеличение напряжения на аноде лампы $Л_1$ скомпенсировать увеличением отрицательного смещения на ее сетке. Известно, что напряжение на сетке влияет на анодный ток в $\mu$ раз сильнее, чем анодное напряжение ($\mu$ — коэффициент усиления лампы). Поэтому, для того чтобы анодный ток регулирующей лампы не изменялся при увеличении входного напряжения, нужно подобрать сопротивления $R_1$ и $R_2$ так, чтобы увеличение напряжения на сопротивлении $R_1$ (т. е. на аноде) было в $\mu$ раз больше увеличения напряжения на сопротивлении $R_2$ (т. е. на сетке).

Очевидно, что при уменьшении входного напряжения уменьшение анодного напряжения лампы $Л_1$ будет скомпенсировано уменьшением отрицательного смещения на сетке. Таким образом, сопротивления $R_1$ и $R_2$ являются как бы плечами моста, служащего для компенсации изменений входного напряжения.

В то же время сопротивление $R_2$, включенное в катод регулирующей лампы, является элементом обратной связи по току, при помощи которого достигается стабилизация тока при изменении сопротивления нагрузки. Предположим, что сопротивление нагрузки по каким-либо причинам увеличилось. Это вызовет уменьшение анодного тока и падения напряжения на сопротивлении $R_2$, а следовательно, и уменьшение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$; сопротивление лампы $Л_1$ для постоянного тока понизится, и ток в цепи нагрузки останется почти без изменений. При уменьшении сопротивления нагрузки смещение на сетке $Л_1$ увеличивается, сопротивление регулирующей лампы повышается, а ток нагрузки также остается почти без изменений. В данном случае работу регулирующей лампы можно сравнить с реостатом, который компенсирует изменения сопротивления включенной последовательно с

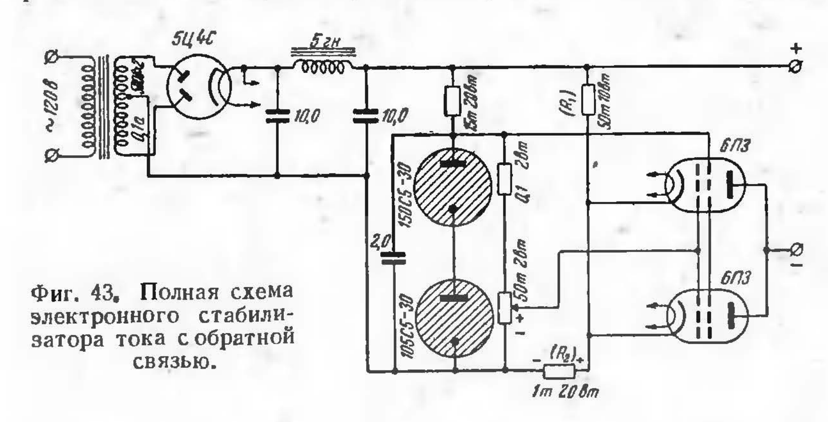


ним нагрузки и поэтому поддерживает в цепи неизменный ток.

Из сравнения схем стабилизаторов напряжения и тока следует, что в стабилизаторах напряжения работа регулирующей лампы происходит за счет изменения выходного напряжения, а в стабилизаторах тока — за счет изменения тока нагрузки.

Недостатком схемы фиг. 42 является большое отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы, что не позволяет применять ее для стабилизации больших токов нагрузки.

На практике применяется схема стабилизатора фиг. 43, работающая по принципу схемы фиг. 42. Сопротивления



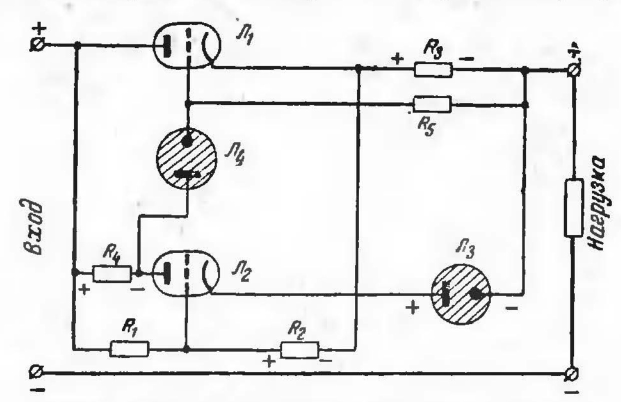
Фиг. 43. Полная схема электронного стабилизатора тока с обратной связью.

$R_1$ и $R_2$ выполняют такие же функции, как соответствующие сопротивления в схеме фиг. 42. В качестве регулирующих ламп применены два тетрода 6П3, соединенных параллельно с целью увеличения допустимого тока нагрузки. Экранные сетки тетродов питаются стабилизованным напряжением 255 *в*, получаемым от последовательно соединенных газовых стабилизаторов 150 С5-30 и 105 С5-30. Для компенсации большого отрицательного смещения, образующегося за счет падения напряжения на катодном сопротивлении $R_2$, в цепь управляющих сеток включено постоянное напряжение, направленное навстречу напряжению на сопротивлении $R_2$. Это напряжение снимается с потенциометра (50 000 *ом*), который подключен к тому же стабилизованному напряжению 255 *в*. Регулируя с помощью этого потенциометра смещение на управляющих сетках, можно легко установить требуемый ток нагрузки.

Следует отметить, что в схемах стабилизаторов тока желательно, чтобы регулирующие лампы обладали большим внутренним сопротивлением. Поэтому в качестве регулирующих ламп чаще всего применяются тетроды и пентоды.

Схема фиг. 43 обеспечивает поддержание тока нагрузки 50 *ма* с точностью $\pm0{,}25\%$ при изменении напряжения сети на $\pm15\%$ или при изменении сопротивления нагрузки от 1 000 до 7 000 *ом*.

Для получения более высокой стабильности можно применить схему с каскадом усиления, представленную на фиг. 44. Схема работает следующим образом. При увеличе-




Фиг. 44. Схема электронного стабилизатора тока с одним каскадом усиления.

нии входного напряжения падение напряжения на сопротивлении $R_2$ увеличивается, отрицательное смещение на сетке усилительной лампы $Л_2$ уменьшается, и ее анодный ток увеличивается. Вследствие этого падение напряжения на анодном сопротивлении $R_4$ увеличивается, и сетка регулирующей лампы $Л_1$ становится более отрицательной; сопротивление регулирующей лампы повышается, а ток в цепи нагрузки остается почти без изменения. При уменьшении сопротивления нагрузки ток через катодное сопротивление $R_3$ возрастает, падение напряжения на нем увеличивается, что вызывает уменьшение отрицательного смещения на сетке $Л_2$. Дальнейшие процессы в схеме протекают так же, как в случае увеличения входного напряжения. Газовый стабилизатор $Л_3$ служит в качестве источника опорного напряжения для лампы $Л_2$, а газовый стабилизатор $Л_4$ создает опорное напряжение для лампы $Л_1$. При понижении входного напряжения и при увеличении сопротивления нагрузки процессы в схеме также сходны между собой и протекают в направлениях, противоположных только что описанным.



## ЭЛЕКТРОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для питания анодов телевизионных электронно-лучевых трубок применяются сравнительно высокие напряжения: до 12 *кв* для трубок прямого видения и до 25 *кв* для проекционных трубок. Сила тока электронного луча трубки обычно составляет несколько десятков или сотен микроампер. Таким образом, выпрямленная мощность, необходимая для питания анодов трубок, не превышает 10—20 *вт*.

Как уже было отмечено ранее, колебания анодного напряжения электронно-лучевых телевизионных трубок вызывают изменения размеров изображения, а также нарушают его фокусировку. В свою очередь величина колебаний анодного напряжения трубки пропорциональна колебаниям напряжения питающей сети, а также зависит от диапазона изменений тока электронного луча. Известно, что наибольшие изменения тока луча трубки происходят при переходе от черного пятна изображения к белому. При этом ток в обычных трубках прямого видения может изменяться на 80—160 *мка*. Увеличение тока нагрузки вызывает уменьшение выпрямленного напряжения, и наоборот. Так как среднее значение тока трубки обычно лежит в пределах 60—120 *мка*, то естественно, что указанные колебания тока (от $\pm40$ до $\pm80$ *мка*) при обычных выпрямителях, обладающих высоким внутренним сопротивлением, вызывают заметные изменения выпрямленного напряжения. Следует отметить, что колебания тока в проекционных трубках значительно превышают приведенные цифры.

В трубках с магнитным отклонением луча ширина и высота изображения обратно пропорциональны корню квадратному из анодного напряжения трубки (при постоянном значении тока в отклоняющей катушке). Это означает, что увеличение анодного напряжения, например, на 10% вызовет уменьшение линейных размеров изображения на 5%.

В трубках с электростатическим отклонением электронного луча размеры изображения обратно пропорциональны первой степени анодного напряжения. С этой точки зрения трубки с электростатической отклоняющей системой тре-

буют более стабильного анодного напряжения, так как изменение его на 10% вызывает изменение линейных размеров изображения также на 10%.

Влияние изменений анодного напряжения на фокусировку изображения учесть значительно труднее. Было, например, отмечено, что изображение, сфокусированное при токе 120 *мка* и напряжении 4,35 *кв*, заметно дефокусировалось при токе 45 *мка*, когда напряжение соответственно повысилось до 4,8 *кв*.

В связи с тем, что в современных высококачественных телевизионных устройствах все чаще начинают применять стабилизацию высокого напряжения, мы рассмотрим в данном параграфе некоторые методы получения стабилизованного анодного напряжения для питания электронно-лучевых трубок. Вопросы стабилизации высокого напряжения чрезвычайно тесно связаны с методами получения этого высокого напряжения. Поэтому нам придется особо остановиться на этих методах. Незначительная выпрямленная мощность, потребляемая в цепи анода электронно-лучевой трубки, позволяет применять для ее питания не совсем обычные схемы высоковольтных выпрямителей.

В настоящее время в качестве источников высокого напряжения для питания электронно-лучевых трубок применяются следующие устройства:

1. Выпрямитель с удвоением или умножением напряжения, питаемый от сети переменного тока с частотой 50 *гц*.
2. Выпрямитель, работающий от импульсов обратного хода строчной развертки телевизионного приемника.
3. Выпрямитель, использующий высокочастотные колебания специального генератора с ударным возбуждением.
4. Выпрямитель, использующий высокочастотные незатухающие колебания специального генератора с самовозбуждением.

В ы п р я м и т е л и п е р в о г о т и п а достаточно подробно описаны в настоящей брошюре (фиг. 16). Основным достоинством выпрямителей этого типа является простота схемы и минимальное количество необходимых деталей. Однако с повышением выпрямленного напряжения габариты анодного трансформатора сильно возрастают, он становится громоздким и тяжелым. Применение кенотронов в этих схемах обычно требует применения изолированных друг от друга обмоток накала, располагаемых на специальном трансформаторе. Так как обмотки накала должны быть хорошо изолированы не только друг от друга, но и от первичной обмотки, то такой накальный трансформатор, несмотря на малую мощность, имеет сравнительно большие габариты и довольно сложен для изготовления. Размещать накальные обмотки на анодном трансформаторе в схемах умножения не рекомендуется из-за трудностей, возникающих в связи с необходимостью очень хорошо изолировать между собой все обмотки.



Из-за низкой частоты выпрямляемого переменного напряжения (50 *гц*) емкость конденсаторов фильтров выпрямителей должна иметь сравнительно большую величину, что приводит к увеличению габаритов выпрямителя в целом.

Выпрямители, непосредственно работающие от сети переменного тока 50 *гц*, обычно обладают большим запасом по мощности и поэтому могут непродолжительное время отдавать в нагрузку ток значительно больше расчетного (при длительной перегрузке могут выйти из строя трансформатор, кенотроны или селеновые выпрямители). Это свойство является нежелательным, так как при неосторожном обращении такой высоковольтный выпрямитель становится опасным для жизни: при случайном прикосновении к полюсам выпрямителя последний сможет создать через тело ток, могущий привести к смертельному исходу.

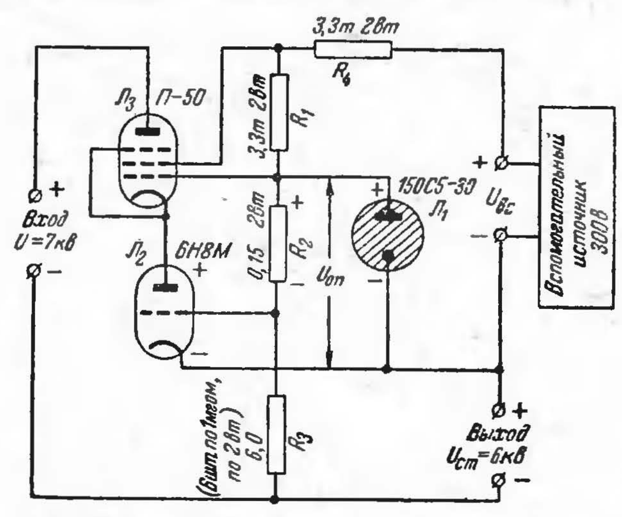
Существенным недостатком выпрямителей описываемого типа является трудность стабилизации высокого выпрямленного напряжения. Применение схем электронной стабилизации (фиг. 37) затрудняется тремя основными причинами.

Первая причина — необходимость расхода сравнительно большого тока (8—12 *ма*) на поддержание горения газового стабилизатора, служащего в качестве опорного напряжения. Так как ток основной нагрузки (трубка) составляет не более 1 *ма*, то очевидно, что габариты такого выпрямителя с электронной стабилизацией непомерно возрастут, а его к. п. д. будет чрезвычайно малым.

Вторая причина — трудность подыскания подходящего триода для работы в качестве регулирующей лампы. Для высоковольтного стабилизованного выпрямителя регулирующая лампа должна быть рассчитана на малый ток и на очень большое напряжение между анодом и катодом (до 2—3 *кв*). Лампы же, предназначенные для высоких напряжений, обычно рассчитаны на большие токи, а поэтому будут весьма плохо использованы в схемах таких стабилизаторов.

Третья причина — очень большое напряжение на аноде усилительной лампы стабилизатора по схеме фиг. 37. Это напряжение почти равно выходному высокому напряжению и не может быть приложено к обычным усилительным лампам.

В силу этих причин маломощные выпрямители с удвоением или умножением напряжения, работающие от сети 50 *гц*, очень редко используются с электронными стабилизаторами напряжения обычного типа. Все сказанное не исключает, конечно, применения электромагнитных стабилизаторов напряжения со стороны питающей сети 50 *гц*.




Фиг. 45. Схема стабилизатора высокого напряжения с вспомогательным источником питания.

В случае, если можно мириться с плохим использованием регулирующей лампы, то для стабилизации высокого напряжения применяется специальная схема электронного стабилизатора, приведенная на фиг. 45. Эта схема предназначена для стабилизации напряжений до 5—6 *кв* при токах до 5—8 *ма* и требует отдельного вспомогательного источника напряжения для питания газового стабилизатора $Л_1$.

Схема работает следующим образом.

При увеличении входного напряжения или уменьшении тока нагрузки несколько повысится напряжение на выходе



схемы, а следовательно, и напряжение на делителе $R_1 R_2 R_3$. Изменившаяся разность между напряжением на $R_2$ и опорным напряжением $U_{оп}$ вызовет увеличение отрицательного потенциала на сетке усилительной лампы $Л_2$; сопротивление лампы $Л_2$ возрастет и падение напряжения на ней увеличится. Разность между напряжением на усилительной лампе $Л_2$, включенной в цепь катода регулирующей лампы $Л_3$, и тем же опорным напряжением $U_{оп}$ изменится и создаст дополнительное отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы $Л_3$. Это в свою очередь вызовет увеличение сопротивления $Л_3$, а следовательно, и увеличение падения напряжения на ней. Выходное напряжение при этом снизится и станет почти равным первоначальной величине, которая была до повышения напряжения.

Точно так же в случае уменьшения входного напряжения или увеличения тока нагрузки напряжение на выходе почти не понизится, так как в результате действия схемы стабилизатора уменьшится падение напряжения на регулирующей лампе $Л_3$.

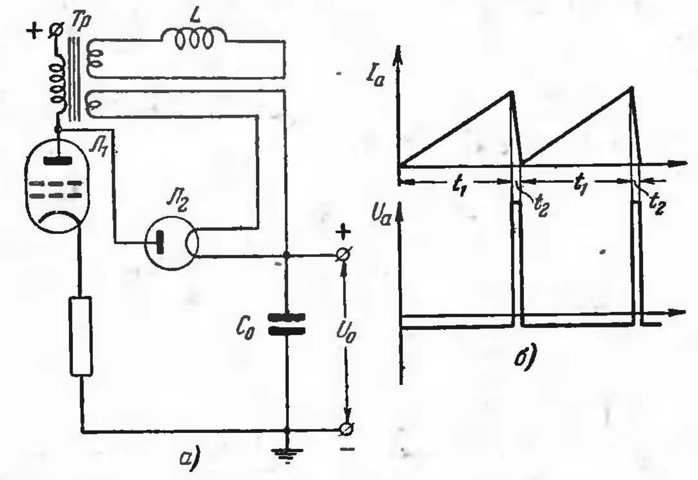
Нужно отметить, что в данной схеме газовый стабилизатор $Л_1$ служит источником опорного напряжения одновременно и для усилительной и для регулирующей ламп. В качестве усилительной лампы $Л_2$ можно применить любой триод с достаточно большим коэффициентом усиления, рассчитаный на пропускание полного тока нагрузки. Напряжение на аноде $Л_2$ примерно равно опорному напряжению $U_{оп}$. Регулирующая лампа $Л_3$ должна выдерживать анодное напряжение до 1,5—2 *кв*. При расчете делителя $R_1 R_2 R_3$ следует иметь в виду, что падение напряжения на $R_1$ примерно равно напряжению $U_{c2}$ на экранной сетке $Л_3$ (50—100 *в*); падение напряжения на $R_2$ — опорному напряжению $U_{оп}$, а падение напряжения на $R_3$ равно выходному напряжению. На сопротивлении $R_4$ должно падать напряжение, равное разности между вспомогательным напряжением $U_{вс}$ и суммой экранного и опорного напряжений:

$$U_{вс} - (U_{c2} + U_{оп}).$$

Для того чтобы избежать опасности пробоя внутри ламп схемы фиг. 45, необходимо сначала включать накалы ламп $Л_2$ и $Л_3$ и вспомогательное напряжение, а затем подавать на вход схемы высокое напряжение. Регулировку выходного напряжения можно производить, меняя потенциал сетки

лампы $Л_2$ при помощи делителя (потенциометра), включенного между $R_2$ и $R_3$. На схеме фиг. 45 указаны данные стабилизатора напряжения на 5 *кв*, 1 *ма*.

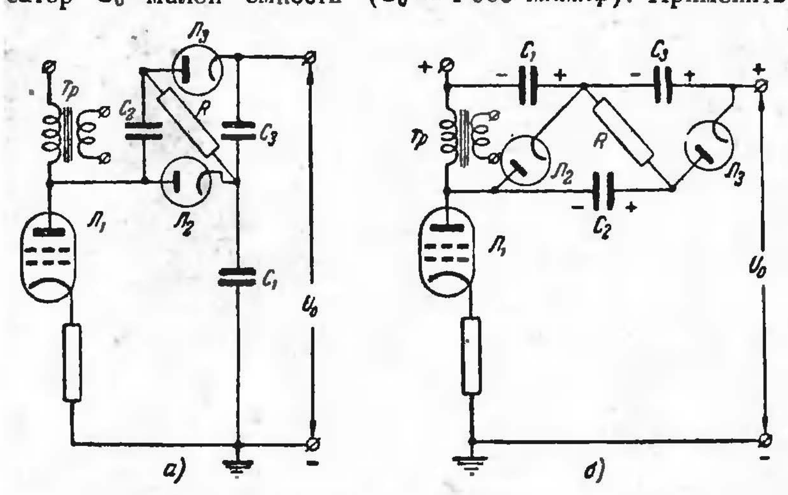
Выпрямители второго типа, работающие от импульсов обратного хода строчной развертки, часто применяются в телевизионных приемниках. Простейшая схема такого выпрямителя приведена на фиг. 46,*а*. Лампа $Л_1$ представляет собой генератор строчной развертки; *Тр* — строчный трансформатор; *L* — отклоняющая катушка. Ток в анодной цепи генераторной лампы имеет пилообразную форму (фиг. 46,*б*). Нарастание тока (прямой ход луча) происходит сравнительно медленно (за время $t_1$), а спадание тока (обратный ход луча) — очень быстро (за время $t_2$).




Фиг. 46. Схема импульсного высоковольтного выпрямителя.

Известно, что при изменении тока, протекающего через катушку индуктивности, на концах ее возникает э. д. с. Чем больше скорость изменения тока или, иначе говоря, чем меньше промежуток времени, за который происходит данное изменение тока, тем больше возникающая на концах катушки э. д. с. Изменение тока за малое время обратного хода ($t_2$) вызывает на первичной обмотке строчного трансформатора *Тр* импульс напряжения 5—7 *кв*. Очевидно, что уменьшение тока через лампу $Л_1$ за время $t_2$ вызывает возрастание напряжения $U_a$ на ее аноде; поэтому возникший импульс имеет положительный полюс на конце катушки, соединенном с анодом генераторной лампы. Этот положительный импульс выпрямляется однополупериодной схемой с кенотроном $Л_2$ (например, типа 1Ц1), который должен быть рассчитан на обратное напряжение, равное только выпрямленному напряжению, а не утроенному выпрямленному, как в обычной однополупериодной схеме. Пониженное обратное напряжение в этой схеме объясняется тем, что обратный по знаку импульс напряжения на катушке, возникающий за время прямого хода ($t_1$), имеет незначительную величину.

Повышенная частота выпрямляемых импульсов ($10\,000 \div 15\,000$ *гц*) позволяет применить входной конденсатор $C_0$ малой емкости ($C_0 = 1\,000$ *мкмкф*). Применять




**Фиг. 47.** Схема импульсного высоковольтного выпрямителя с удвоением напряжения.

вместо кенотрона $Л_2$ селеновый выпрямитель не рекомендуется, так как из-за его большой собственной емкости сильно снижается выпрямленное напряжение.

С помощью схемы фиг. 46,*а* можно получить выпрямленное напряжение до 8—12 *кв*.

В случае, если полученное выпрямленное напряжение недостаточно, его можно повысить с помощью специальной схемы удвоения напряжения, приведенной на фиг. 47,*а*. Эта схема предназначена для удвоения напряжения в схемах импульсных выпрямителей. Работу схемы фиг. 47,*а* легко

понять, если ее изобразить так, как это показано на фиг 47,*б*, где конденсатор $C_1$ присоединен не к корпусу, а к плюсу источника анодного напряжения генераторной лампы $Л_1$. Вновь полученная схема фиг. 47,*б* полностью эквивалентна схеме фиг. 47,*а*, так как для импульсов обратного хода строчной развертки потенциалы корпуса (земли) и плюса источника анодного напряжения лампы $Л_1$ практически равны между собой.

За время импульса обратного хода $t_2$ конденсатор $C_1$ заряжается через кенотрон $Л_2$ до амплитудного значения импульса напряжения $\left(\frac{U_0}{2}\right)$. За время прямого хода $t_1$ конденсатор $C_2$ заряжается от конденсатора $C_1$ через сопротивление $R$ (1 — 2 *мгом*) почти до такого же потенциала $\left(\frac{U_0}{2}\right)$. Во время следующего импульса обратного хода конденсатор $C_3$ заряжается также до потенциала $\frac{U_0}{2}$ (напряжения на $C_1$ и $C_2$ при этом взаимно компенсируются). В результате сумма напряжений на конденсаторах $C_1$ и $C_3$ представляет собой приблизительно удвоенное значение амплитуды импульса напряжения за время обратного хода развертки ($U_0$).

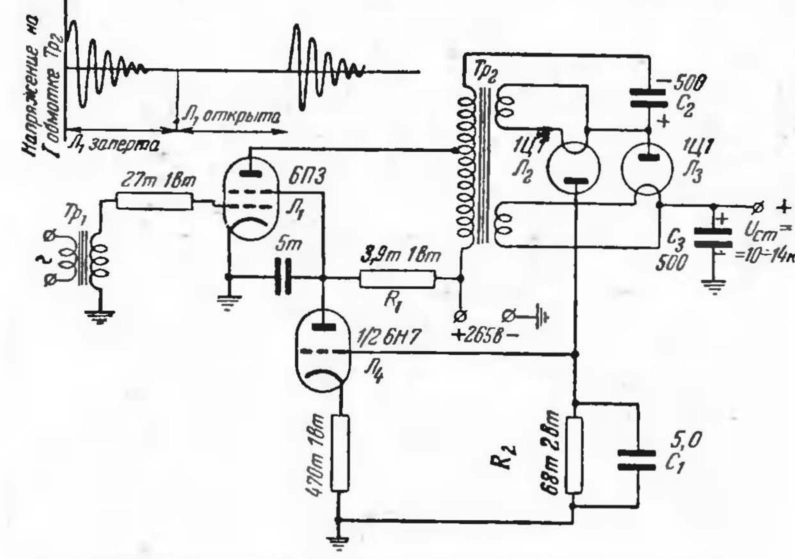
Достоинствами выпрямителей импульсного типа являются их простота, а также безопасность при обслуживании. Последнее обстоятельство объясняется тем, что при увеличении нагрузки, которое может произойти при случайном прикосновении к полюсам выпрямителя, выпрямленное напряжение настолько падает, что не представляет уже опасности для жизни.

Серьезным недостатком выпрямителей импульсного типа является большая величина внутреннего сопротивления, что является причиной сравнительно больших изменений выпрямленного напряжения при колебаниях тока нагрузки. Стабилизация напряжения импульсных выпрямителей неосуществима без значительного усложнения схемы; поэтому в практически применяемых схемах стабилизация напряжения отсутствует.

Одна из схем выпрямителей третьего типа, использующих высокочастотные затухающие колебания генератора с ударным возбуждением, представлена на фиг. 48.



На управляющую сетку тетрода $Л_1$ подается переменное напряжение с большой амплитудой (около 120 *в*) от трансформатора $Тр_1$. В отрицательный полупериод анодный ток тетрода резко падает и на первичной обмотке трансформатора $Тр_2$ возникает импульс высокого напряжения (около 5—6 *кв*). Первичная обмотка трансформатора $Тр_2$ обладает собственной емкостью ($C_{соб}$), которая с индуктивностью обмотки образует колебательный контур, обладающий




Фиг. 48. Схема высоковольтного выпрямителя с генератором затухающих колебаний в. ч.

собственной частотой около 100 *кгц*. Возникший в момент прекращения анодного тока импульс заряжает емкость $C_{соб}$, в результате чего в контуре возникают затухающие колебания с частотой, равной собственной частоте контура. Следует отметить, что эти колебания прекращаются еще до того, как на сетке генераторной лампы $Л_1$ появляется положительный полупериод переменного напряжения и, следовательно, до того, как возникает анодный ток через эту лампу.

Напряжение высокой частоты, возникающее на первичной обмотке трансформатора $Тр_2$, выпрямляется с помощью

схемы удвоения напряжения, отличающейся от описанной ранее (см. фиг. 14) схемы. Один конец первичной обмотки трансформатора $Tp_2$ соединен через источник низкого напряжения (265 *в*) с землей. В момент, когда верхний конец обмотки имеет отрицательный потенциал по отношению к земле, конденсатор $C_2$ заряжается через кенотрон $Л_2$ до амплитуды переменного напряжения. Когда верхний конец обмотки становится положительным, напряжение обмотки складывается с напряжением на конденсаторе $C_2$, в результате чего конденсатор $C_3$ заряжается через кенотрон $Л_3$ почти до удвоенного напряжения.

Регулировку выпрямленного напряжения можно в некоторых пределах производить, меняя анодное и экранное напряжение генераторной лампы $Л_1$.

В схеме фиг. 48 предусмотрена возможность стабилизации выпрямленного напряжения при изменениях тока нагрузки. Для этой цели служит триод $Л_4$. При увеличении тока нагрузки выпрямленное напряжение падает, но одновременно увеличивается падение напряжения на сопротивлении $R_2$ и увеличивается отрицательный потенциал на сетке триода $Л_4$. Анодный ток лампы $Л_4$ уменьшается, а напряжение на ее аноде увеличивается. Одновременно с этим повышается напряжение на экранной сетке генераторной лампы $Л_1$, что вызывает увеличение переменного напряжения высокой частоты, а следовательно, и выпрямленного напряжения. Таким образом, понижение выпрямленного напряжения при увеличении тока нагрузки компенсируется действием схемы, в результате чего напряжение на выходе остается почти без изменений. При уменьшении тока нагрузки схема стабилизации уменьшает возросшее напряжение.

Как видно из схемы фиг. 48, для фильтра требуются конденсаторы весьма небольшой емкости. Сердечник трансформатора $Tp_2$ изготовляется из специальной высокочастотной стали или порошкообразного железа. Существенным преимуществом подобных выпрямителей являются их небольшие габариты, получаемые за счет малых размеров фильтра и трансформатора $Tp_2$.

Высокое напряжение, получаемое от этого выпрямителя, не опасно для жизни, так как увеличение тока нагрузки свыше определенного предела резко снижает амплитуду высокочастотных колебаний, а следовательно, и величину выпрямленного напряжения.



Для того чтобы устранить влияние колебаний анодного и экранного напряжений генераторной лампы $Л_1$ на величину высокого выпрямленного напряжения, необходимо иметь стабилизованный источник напряжения, питающий эти цепи (в схеме фиг. 48 — 265 *в*).

В некоторых выпрямительных схемах описываемого типа для создания резко изменяющегося напряжения на управляющей сетке генераторной лампы $Л_1$ применяют специальные импульсные генераторы (например, блокинг-генераторы) или связывают управляющую сетку $Л_1$ с каким-либо импульсным генератором, имеющимся в данном устройстве.

**Выпрямители четвертого типа**, использующие для выпрямления напряжения высокой частоты, вырабатываемое специальным генератором с самовозбуждением, в последнее время получают все большее и большее распространение. Эти схемы применяются для получения высоких напряжений до 30 *кв* и даже выше. С работой выпрямителей этого типа можно познакомиться по схеме фиг. 49, позволяющей получить выпрямленное напряжение 12 *кв*.

Генератор незатухающих колебаний высокой частоты на тетроде $Л_1$ имеет контур в анодной цепи, состоящий из конденсаторов $C_1$ и катушки $L_1$. Катушка обратной связи $L_3$ включена последовательно с сопротивлением утечки в цепь управляющей сетки $Л_1$. С катушкой $L_1$ индуктивно связана катушка $L_2$ вторичного контура. В катушке $L_2$ (имеющей в 20 раз больше витков, чем в катушке $L_1$) индуктируется повышенное напряжение высокой частоты, которое затем выпрямляется с помощью обычной схемы удвоения на кенотронах $Л_2$ и $Л_3$. Следует иметь в виду, что катушка $L_2$ образует вторичный контур, емкость которого складывается из собственной емкости катушки, емкости анод — катод кенотронов и емкости монтажа.

Питание накала кенотронов производится от обмоток $L_4$ и $L_5$, индуктивно связанных с катушками $L_1$ и $L_2$. Таким образом, генератор высокой частоты обеспечивает всю необходимую мощность, потребляемую выпрямителем.

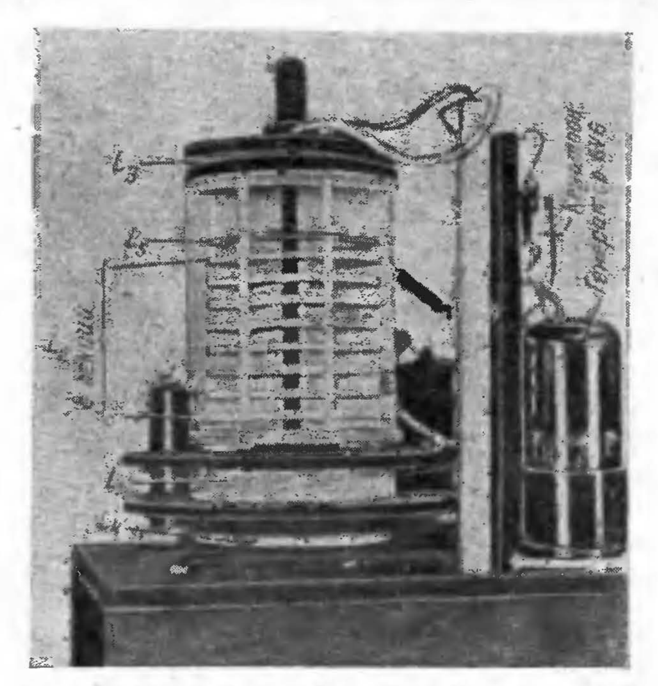
Наибольшее напряжение на вторичном контуре, а следовательно, и на выходе выпрямителя будет в том случае, когда частота колебаний генератора будет близка к собственной частоте вторичного контура. Изменяя емкость анодного (первичного) контура генератора $C_1$, можно изменять частоту генератора, а следовательно, регулировать величину выпрямленного высокого напряжения. Для более устойчи-

Фиг. 49. Схема стабилизованного высоковольтного выпрямителя с генератором незатухающих колебаний в. ч.



вой работы выпрямителя частота генератора выбирается немного ниже собственной частоты вторичного контура. Это снижает выпрямленное напряжение, но зато уменьшает его колебания при изменениях тока нагрузки. Частота генераторов, работающих в схемах подобного типа, лежит обычно в пределах 100 ÷ 200 *кгц*.

На фиг. 50 приведена фотография макета выпрямителя, собранного по схеме фиг. 49. В макете применены специаль-



Фиг. 50. Макет высоковольтного выпрямителя с генератором в. ч.

ные кенотроны, позволяющие получить выпрямленное напряжение 12 *кв*. Выпускаемые отечественной промышленностью кенотроны типа 1Ц1 позволяют получать с помощью схемы фиг. 49 выпрямленное напряжение около 8 *кв*. Понизить напряжение с 12 до 8 *кв* можно, увеличив емкость $C_1$ анодного контура.

Катушки трансформатора высокой частоты ($L_1$, $L_2$, $L_3$, $L_4$ и $L_5$) наматываются на каркасах из материала, обладаю-

щего высокими изоляционными свойствами и малыми потерями на частоте генератора (полистирол, эбонит). Как видно из фиг. 50, все пять катушек насажены на один эбонитовый стержень, укрепленный на эбонитовом основании. Катушки $L_2$ и $L_5$ намотаны на секционированном полистироловом каркасе, а остальные катушки—на эбонитовых каркасах.

Основные данные катушек трансформатора высокой частоты приведены в табл. 9.

Таблица 9

**Основные данные катушек трансформатора высокой частоты**

| Данные | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $L_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Наружный диаметр каркаса, *мм* . . . . . . | 100 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Длина каркаса, *мм* . . | 16 | 75 | 10 | 10 | — |
| Внутренний диаметр каркаса (обмотки), *мм* | 45 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| Число секций катушки | 1 | 8 (+1) | 1 | 1 | 1 |
| Ширина секции, *мм* . . | 9,5 | 1,6 | 3,2 | 3,2 | 1,6 |
| Число витков в секции | 125 | 300 | 150 | 2 | 2 |
| Диаметр, *мм* . . . . . | 0,1×27 | 0,15 | 0,27 | 0,71 | 0,71 |
| Марка провода . . . . | Литцендрат | ПЭШО | ПЭШО | ПЭШО | ПЭШО |
| Индуктивность, *мгн* . . | 1 | 145 | — | — | — |
| Добротность катушки при 100 *кгц* (без нагрузки) . . . . . . . | 150 | 165 | — | — | — |

Примечания: 1. $L_2$ мотается в первых восьми секциях полистиролового каркаса.

2. Число витков $L_4$ и $L_5$ указано для кенотрона 1Ц1.

3. На весь провод катушки $L_4$ надеть кембриковую трубку.

4. $L_5$ наматывается в девятой секции полистиролового каркаса катушки $L_2$.

Во избежание потерь конструкция трансформатора высокой частоты не должна иметь никаких металлических частей. Генератор и выпрямитель с фильтрами полностью экранируются от остальных элементов схемы, а фильтры высокого и низкого напряжения, кроме того, помещаются во внутренние экранированные отсеки, отдельно от деталей генератора и выпрямителя (см. схему фиг. 49). Такое тщательное экранирование необходимо для того, чтобы высокая частота от генератора не попадала в другие цепи схемы, где из-за этого могут возникнуть помехи, нарушающие нормальную работу. Высокое напряжение, создаваемое в схеме выпрямителя с генератором высокой частоты, безопасно для



жизни, так как увеличение нагрузки, вызываемое прикосновением к выводам высокого напряжения, срывает генерацию и тем самым снижает выпрямленное напряжение до нуля.

Схема выпрямителя с генератором незатухающих колебаний имеет ряд преимуществ по сравнению со схемой, использующей генератор с ударным возбуждением, т. е. генератор затухающих колебаний (фиг. 48). Основные преимущества ее следующие:

1. Отсутствует необходимость в источнике импульсного напряжения.
2. Легко регулируется выпрямленное напряжение.
3. Повышается к. п. д. выпрямителя (до 50—60%).
4. Понижается внутреннее сопротивление выпрямителя.
5. Увеличивается допустимый ток нагрузки (до 2—3 *ма*).
6. Трансформатор высокой частоты может быть выполнен без сердечника.
7. Возможна стабилизация высокого выпрямленного напряжения не только при изменениях тока нагрузки, но и при изменениях напряжения сети, питающей выпрямитель низкого напряжения (+350 *в*).

В схеме фиг. 49 высокое выпрямленное напряжение зависит от режима работы генераторной лампы, в частности, от ее анодного напряжения и напряжения на экранной сетке. Очевидно, что, регулируя анодное и экранное напряжения генераторной лампы, можно поддерживать выходное напряжение высоковольтного выпрямителя постоянным при изменениях тока нагрузки и напряжения питающей сети. Так как мощность высоковольтного выпрямителя позволяет включить на его выходе высокоомный делитель, то для стабилизации питания генераторной лампы можно применить обычный электронный стабилизатор, управляемый выходным напряжением высоковольтного выпрямителя.

Схема такого стабилизатора для высоковольтного выпрямителя показана слева на фиг. 49. В качестве усилительной лампы применен пентод $Л_4$. Так как анодное и экранное напряжения генераторной лампы $Л_1$ стабилизованы, то влияние изменений напряжения питающей сети на выпрямленное напряжение исключается. Влияние изменения тока нагрузки на выпрямленное напряжение компенсируется в схеме следующим образом. При понижении выпрямленного напряжения, что вызывается увеличением тока нагрузки, уменьшается напряжение на высокоомном делителе $R_1 R_2 R_3$. Одновременно уменьшается напряжение на той части дели-

теля ($R_3$), которая включена между сеткой усилительной лампы $Л_4$ и землей. Напряжение на сетке лампы $Л_4$ становится более отрицательным, анодный ток лампы падает, и падение напряжения на анодном сопротивлении уменьшается. При этом сетка регулирующей лампы $Л_5$ становится менее отрицательной, сопротивление лампы $Л_5$ для постоянного тока уменьшается, а напряжение на выходе электронного стабилизатора возрастает. В результате возрастает напряжение на аноде и на экранной сетке генераторной лампы $Л_1$, что ведет к увеличению напряжения на выходе высоковольтного выпрямителя. Это увеличение почти полностью компенсирует понижение выходного напряжения, вызванное увеличением тока нагрузки, и, таким образом, высокое выпрямленное напряжение остается почти без изменений. В случае повышения выходного напряжения при уменьшении тока нагрузки схема стабилизатора действует так, что напряжение на аноде и экранной сетке генераторной лампы уменьшается. Это приводит к соответствующему снижению выпрямленного напряжения и, следовательно, к компенсации первоначального повышения напряжения из-за уменьшения тока нагрузки.

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Расчет электронного стабилизатора сводится к получению или выбору исходных данных, к выбору схемы стабилизатора и расчету ее режима и к расчету схемы выпрямителя, питающего стабилизатор. Весь расчет стабилизатора лучше всего уяснить на конкретном примере, который мы и проделаем.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Необходимо рассчитать стабилизатор напряжения и выпрямитель для приемника и оконечного усилителя, исходя из следующих данных:

Нестабилизованное напряжение $U = +500$ *в*.

Ток нагрузки по нестабилизованному напряжению 100 *ма*.

Пульсация нестабилизованного напряжения 1—2%.

Стабилизованное напряжение $U_{ст} = +300$ *в*.

Ток нагрузки по стабилизованному напряжению $I_н = 60$ *ма*.

Номинальное значение напряжения питающей сети $U_1 = 120$ *в*.



Изменение напряжения питающей сети происходит в пределах от —15 до +5% от номинального значения, т. е. от 102 до 126 *в*.

Частота питающей сети $f = 50$ *гц*.

Трансформатор выпрямителя должен иметь обмотку накала для ламп приемника и усилителя с напряжением 6,3 *в* и током 4,5 *а*.

### ВЫБОР СХЕМЫ СТАБИЛИЗАТОРА И РАСЧЕТ ЕЕ РЕЖИМА

В данном случае выбор схемы стабилизатора определяется заданным током нагрузки $I_н = 60$ *ма* и сравнительно большими изменениями напряжения питающей сети (от +5 до —15%). Очевидно, что при этих условиях должна быть выбрана схема электронного стабилизатора напряжения. Так как особых требований к качеству стабилизации не предъявляется, то ограничимся схемой стабилизатора с одним каскадом усиления постоянного тока.

В качестве регулирующей лампы выбираем тетрод 6П3 в триодном соединении. Можно заранее сказать, что мощность рассеяния на аноде регулирующей лампы 6П3 превысит допустимую. Действительно, падение напряжения на лампе будет достигать $U - U_{ст} = 200$ *в*, что при токе 60 *ма* уже составляет 12 *вт* вместо 10 *вт*, допустимых в триодном режиме. Поэтому ставим параллельно регулирующей лампе разгружающее ее шунтирующее сопротивление $R_ш$.

В качестве усилительной лампы используем триодную часть двойного диод-триода 6Г7 (или 6Г7С), имеющую большой коэффициент усиления ($\mu = 70$).

В качестве источника опорного напряжения ($U_{оп}$) выбираем газовый стабилизатор 150С5-30, имеющий наивысшее напряжение горения (150 *в*) среди существующих газовых стабилизаторов. Остаток напряжения ($U_{ст} - U_{оп} = 150$ *в*) вполне достаточен для нормальной работы усилительной лампы 6Г7.

Схему выпрямителя целесообразно выбрать двухполупериодную с однозвенным фильтром $LC$ (см. фиг. 51).

Данные деталей, указанные на схеме, получены в результате дальнейшего расчета.

Расчет режима схемы стабилизатора удобно свести в табл. 10.

Таблица 10

**Расчет электронного стабилизатора напряжения**

| Напряжение сети $U_1$, в | Напряжение сети, $U_1$, % | Ток нагрузки $I_н$, ма | Общий ток стабилизатора $I$, ма | Напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст}$, в | Напряжение на входе стабилизатора $U$, в | Напряжение на аноде регулирующей лампы $U_{a1}$, в | Ток через шунтирующее сопротивление $I_ш$, ма | Ток через регулирующую лампу $I_{a1}$, ма | Мощность рассеяния на аноде регулирующей лампы $P_{a1}$, вт | Мощность, выделяемая на шунтирующем сопротивлении $P_ш$, вт | Смещение на сетке регулирующей лампы $U_{c1}$, в | Ток через усилительную лампу $I_{a2}$, мка | Анодное напряжение на усилительной лампе $U_{a2}$, в | Смещение на сетке усилительной лампы $U_{c2}$, в |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 102 | 85 | 60 | 70 | 300 | 420 | 120 | 20 | 50 | 6 | 2,4 | —3 | 10 | 147 | —3,5 |
| 120 | 100 | 60 | 70 | 300 | 495 | 195 | 33 | 37 | 7,2 | 6,45 | —15 | 50 | 135 | —2,9 |
| 126 | 105 | 60 | 70 | 300 | 520 | 220 | 37 | 33 | 7,25 | 8,15 | —19 | 63 | 131 | —2,7 |
| Примечание | — | — | — | — | — | — | $R_ш =$ 6 000 ом | — | — | — | — | $R_{a2} = 0,3$ мгом | — | — |



Пояснения к заполнению каждой графы расчетной таблицы приводятся в нижеследующих пунктах (номер пункта соответствует номеру графы табл. 10).

1. В графе 1 указаны заданные значения напряжения питающей сети (минимальное, номинальное и максимальное).

2. В графе 2 указаны значения напряжения сети в процентах от номинального (120 *в*).

3. В графе 3 указано заданное значение тока нагрузки.

4. В графе 4 указан общий ток, отбираемый от стабилизатора с учетом тока $I_{оп}$, потребляемого газовым стабилизатором 150С5-30.

Так как газовый стабилизатор питается от стабилизованного напряжения, то ток $I_{оп}$ при работе практически не изменяется и может быть выбран небольшим.

В данном случае $I_{оп} = 10$ *ма*, а поэтому

$$I = I_н + I_{оп} = 60 + 10 = 70 \text{ ма}.$$

Током через делитель $R_1R_2$ и через лампу 6Г7 можно пренебречь.

5. В графе 5 указано заданное стабилизованное напряжение.

6. Для того чтобы определить необходимое напряжение на входе стабилизатора (графа 6), нужно предварительно задаться минимальным падением напряжения на регулирующей лампе. Очевидно, что минимальное напряжение на регулирующей лампе будет при минимальном напряжении питающей сети (строка 1, графы 1 и 2). Для лампы 6П3 минимальное падение напряжения обычно выбирают в пределах от 120 до 150 *в*. Задаваясь минимальным падением напряжения на лампе в 120 *в* (графа 7), находим минимальное входное напряжение

$$U_{мин} = U_{ст} + U_{a1\,мин} = 300 + 120 = 420 \text{ в},$$

соответствующее минимальному напряжению сети (85% от номинала, графа 2).

Полагая, что изменения входного напряжения $U$ пропорциональны изменению напряжения сети $U_1$, находим величину номинального и максимального входного напряжения

$$U_{ном} = \frac{U_{мин}}{0,85} = \frac{420}{0,85} = 495 \text{ в};$$

$$U_{макс} = U_{ном} \cdot 1,05 = 495 \cdot 1,05 = 520 \text{ в}.$$

7. В графе 7 указано напряжение на регулирующей лампе, определяемое как разность между напряжениями на входе и на выходе стабилизатора,

$$U_{a1} = U - U_{cm}.$$

8. При определении тока $I_ш$ через шунтирующее сопротивление (графа 8) надо иметь в виду следующее. Как видно из схемы фиг. 51, общий ток стабилизатора складывается из суммы токов через регулирующую лампу и через шунтирующее сопротивление. При минимальном напряжении на аноде регулирующей лампы ток через шунтирующее сопротивление будет также минимальным, а ток через регулирующую лампу будет, следовательно, максимальным. Так как максимальный ток через регулирующую лампу протекает при минимальном анодном напряжении, то очевидно, что отрицательное смещение на ее сетке будет при этих условиях минимальным. Величиной этого минимального смещения на сетке регулирующей лампы нужно задаться заранее.

Из семейства анодных характеристик лампы 6П3 (фиг. 38) выбираем минимальное смещение $U_{c1} = -3$ *в* при минимальном анодном напряжении $U_{a1} = 120$ *в* (строка 1 в графе 12) и находим соответствующий анодный ток $I_{a1\,макс} = 50$ *ма*.

Как указывалось, ток через шунт будет при этом минимальным. Он равен разности между общим током стабилизатора и током через регулирующую лампу

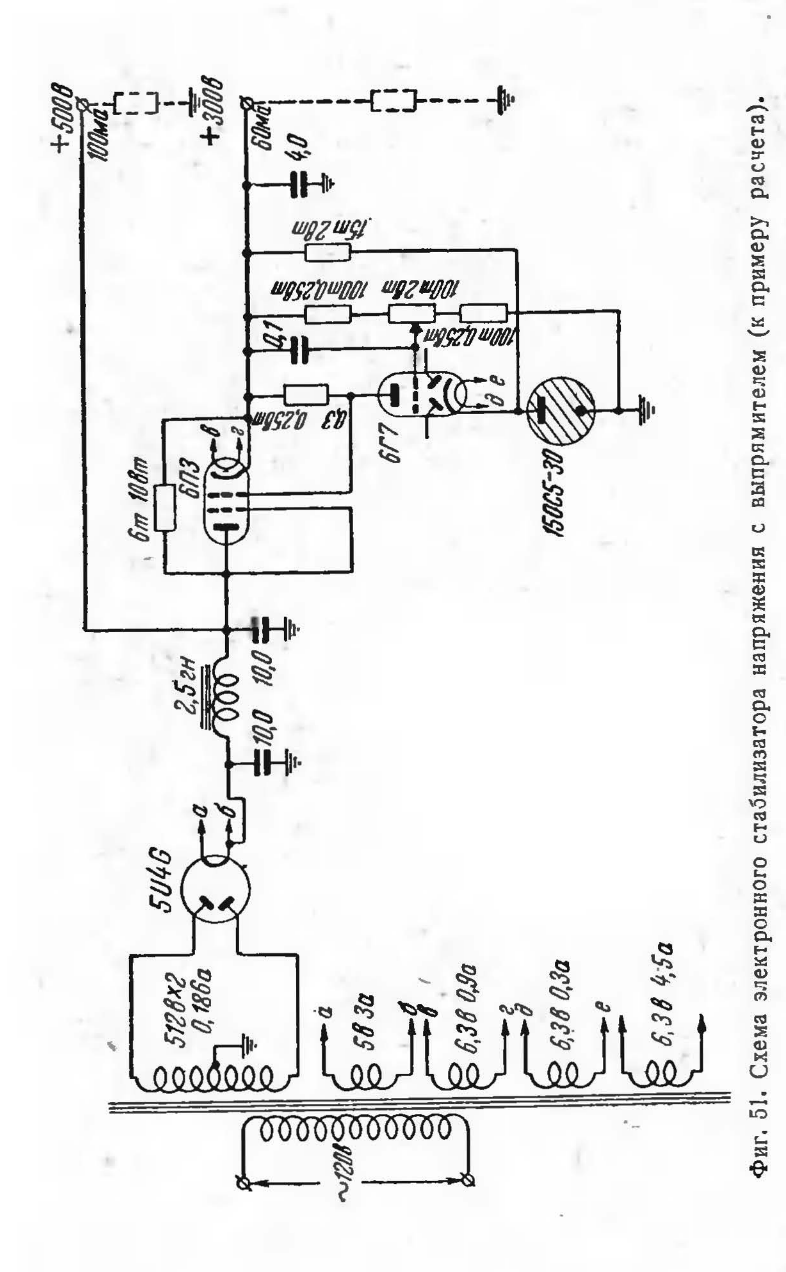
$$I_{ш.\,мин} = I - I_{a1\,макс} = 70 - 50 = 20 \text{ ма}.$$

Сопротивление шунта равно:

$$R_ш = \frac{U_{a1\,мин}}{I_{ш.\,мин}} = \frac{120}{20 \cdot 10^{-3}} = 6\,000 \text{ ом}.$$

Зная $U_{a1}$ и $R_ш$, легко найти другие значения тока через шунт по формуле

$$I_ш = \frac{U_{a1}}{R_ш}.$$




Фиг. 51. Схема электронного стабилизатора напряжения с выпрямителем (к примеру расчета).

9. В графе 9 указан ток через регулирующую лампу, определяемый как разность между общим током стабилизатора и током через шунт

$$I_{a1} = I - I_{ш}.$$

Желательно, чтобы минимальный ток через регулирующую лампу (строка 3) был больше, чем 5—7 *ма*. В данном примере это условие легко выполняется.

10. В графе 10 указана мощность, рассеиваемая на аноде регулирующей лампы и определяемая как произведение анодного напряжения лампы на ее анодный ток

$$P_{a1} = U_{a1} I_{a1}.$$

Для лампы 6П3 в триодном режиме допустимая мощность рассеяния не должна превышать 10 *вт*. Если $P_{a1}$ превышает допустимую величину, то следует уменьшить шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ или включить несколько регулирующих ламп параллельно.

11. Для выбора шунтирующего сопротивления необходимо знать мощность, выделяемую на нем при работе схемы стабилизатора (графа 11),

$$P_{ш} = U_{a1} I_{ш}.$$

Сопротивление $R_{ш}$ должно быть рассчитано на максимальную мощность, которая будет выделяться на сопротивлении (в нашем примере около 8 *вт*).

12. Смещение на сетке регулирующей лампы (графа 12) находят из семейства анодных характеристик (фиг. 38) по известным значениям анодного напряжения $U_{a1}$ и анодного тока $I_{a1}$ (графы 7 и 9).

13. Для нахождения анодного тока усилительной лампы 6Г7 (графа 13) следует предварительно выбрать величину сопротивления анодной нагрузки $R_{a2}$ в соответствии с величиной внутреннего сопротивления лампы ($R_{i2} = 150\,000$ *ом*).

Выбираем

$$R_{a2} = 2R_{i2} = 2 \cdot 0{,}15 = 0{,}3 \text{ мгом}.$$



Тогда анодный ток будет равен (см. пример 24):

$$I_{a2} = \frac{|U_{c1}|}{R_{a2}},$$

где $[U_{c1}]$ означает абсолютную величину смещения на сетке регулирующей лампы (без учета знака).

Минимальный анодный ток (строка 1) составляет 10 *мка*, что является крайним допустимым пределом, ниже которого спускаться нежелательно.

14. Анодное напряжение усилительной лампы (графа 14) определяется как разность между выходным напряжением и суммой, состоящей из напряжения на сетке регулирующей лампы и опорного напряжения,

$$U_{a2} = U_{ст} - (|U_{c1}| + U_{оп}).$$

15. В графе 15 указано смещение на сетке усилительной лампы 6Г7, которое находят из семейства анодных характеристик (фиг. 52) по известным уже значениям анодного тока $I_{a2}$ и анодного напряжения $U_{a2}$ (графы 13 и 14). Зная разность между крайними значениями смещения на сетке усилителя ($\Delta U_{c2}$), можно найти величину полного изменения напряжения на выходе стабилизатора ($\Delta U_{ст}$) при изменении напряжения сети от минимума до максимума:

$$\Delta U_{ст} = \Delta U_{c2} \frac{U_{ст}}{U_{оп}} = (3{,}5 - 2{,}7) \cdot \frac{300}{150} = 1{,}6 \text{ в},$$

что составляет около 0,5% от номинального выходного напряжения 300 *в*.

Необходимая величина смещения на сетке усилительной лампы электронного стабилизатора напряжения устанавливается автоматически при установке выходного напряжения потенциометром $R_1R_2$. При этом, конечно, предполагается, что расчет схемы был произведен правильно и данные установленных деталей соответствуют расчетным.

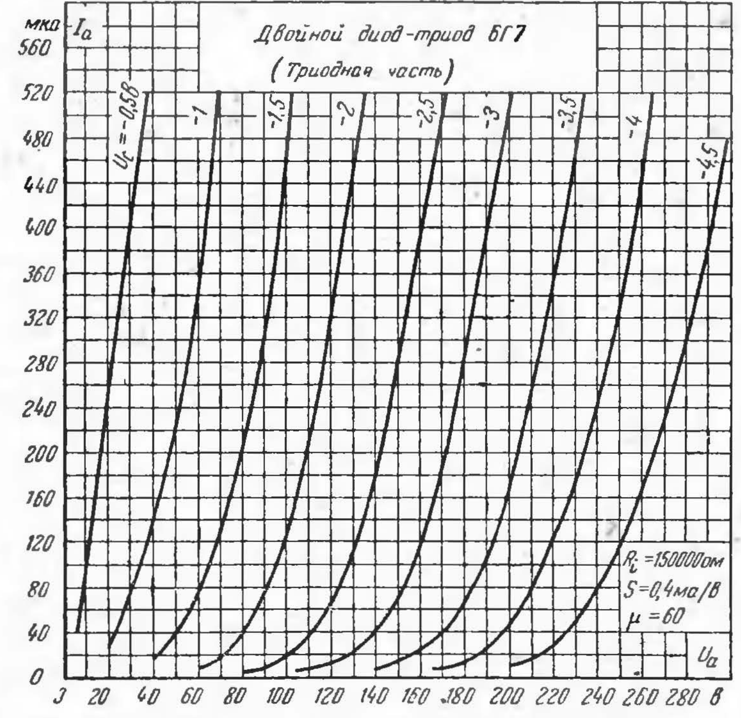
Найдем величину сопротивления делителя $R_1R_2$, полагая, что ток через него равен 1 *ма*. Тогда

$$R_1 + R_2 = \frac{U_{ст}}{1 \cdot 10^{-3}} = \frac{300}{1 \cdot 10^{-3}} = 300\,000 \text{ ом}.$$

Сопротивление плеча $R_2$ определим по формуле (33):

$$R_2 = \frac{U_{on}}{U_{cm}} \cdot (R_1 + R_2) = \frac{150}{300} \cdot 300 \cdot 10^3 = 150\,000 \text{ ом}.$$

Для обеспечения более плавной установки выходного напряжения делитель составляем из двух постояных и




Фиг. 52. Анодные характеристики триодной части лампы 6Г7.

одного переменного сопротивления по 100 000 *ом* каждое (фиг. 51).

На этом заканчивается расчет стабилизатора по схеме фиг. 51.

Рассчитанный стабилизатор должен работать при заданных колебаниях напряжения сети (−15 + 5%). Уменьшение напряжения сети более чем на 15% от номинала может привести к появлению на сетке регулирующей лампы положительного потенциала, а следовательно, к возникновению сеточного тока. Увеличение напряжения сети более чем на 5% от номинала может создать положительный потенциал на сетке усилительной лампы и также вызвать сеточный ток. Обе эти причины ведут к полному нарушению работы электронного стабилизатора, лампы которого могут работать только при отсутствии сеточных токов.



Расчет электронного стабилизатора без шунтирующего сопротивления $R_ш$ производится тем же способом. В расчетной таблице (табл. 10) будут при этом отсутствовать графы 8 и 11. Задаваясь минимальным анодным напряжением на регулирующей лампе, надо иметь в виду, что при заданном токе через лампу отрицательное смещение на ее сетке должно быть не менее 1—3 *в*.

Расчет режима регулирующей лампы в стабилизаторе с двумя каскадами усиления (фиг. 40) ничем не отличается от вышеприведенного расчета. Режим усилительных ламп рассчитывается с помощью формул (36) и (37). Остальные элементы схемы фиг. 40 также могут быть рассчитаны без затруднений.

На 2-й и 3-й стр. обложки приведены анодные характеристики усилительных ламп 6Н9М и 6Н8М и регулирующей лампы П-50 (LS-50), которые могут понадобиться при расчетах электронных стабилизаторов.

## РАСЧЕТ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ СТАБИЛИЗАТОРА

Из задания и из табл. 10 следует, что выпрямитель должен давать при номинальном напряжении сети (120 *в*) нестабилизованное напряжение 500 *в* при токе 100 *ма* и 495 *в* при токе 70 *ма* для питания электронного стабилизатора напряжения. Схема выпрямителя выбрана двухполупериодная (фиг. 51). Полагая, что падение напряжения $U_{др}$ на дросселе фильтра составит 20 *в*, получаем окончательные данные для расчета выпрямителя:

$$U_0 = U + U_{др} = 500 + 20 = 520 \text{ в};$$

$$I_0 = 100 + 70 = 170 \text{ ма}.$$

Увеличение напряжения на входе стабилизатора на 5 *в* (500 *в* вместо полученных из расчета 495 *в*) никакого ухудшения в работу схемы не внесет и на режим ее практически не повлияет.

1. Для выбора кенотрона определим из табл. 3 следующие величины (графы 3, 4 и 5):

Ток в одном плече

$$\frac{I_0}{2}=\frac{170}{2}=85\ ма;$$

$$U_{обр}=3U_0=3\cdot 520=1\,560\ в;$$

$$I_{макс}=3{,}5I_0=3{,}5\cdot 170=595\ ма\ \text{(на 1 анод)}.$$

Из табл. 1 выбираем подходящий по параметрам кенотрон 5U4G, имеющий $R_i=200$ *ом* (на 1 анод).

2. Для определения сопротивления фазы выпрямителя

$$R_ф=R_i+r_{тр}\ \text{(табл. 3, графа 7)},$$

найдем сопротивление трансформатора по формуле (2) или из графика фиг. 21:

$$r_{тр}=k\frac{U_0}{I_0\sqrt[4]{U_0I_0}}=0{,}18\frac{520}{0{,}17\sqrt[4]{520\cdot 0{,}17}}=180\ ом.$$

Тогда

$$R_ф=200+180=380\ ом.$$

3. Коэффициент $A$ определяем по формуле (3):

$$A=\frac{3{,}14\,I_0R_ф}{mU_0}=\frac{3{,}14\cdot 0{,}17\cdot 380}{2\cdot 520}=0{,}195.$$

4. По формуле (4) находим напряжение на вторичной обмотке:

$$U_2=U_0(0{,}75+1{,}2A)=520\,(0{,}75+1{,}2\cdot 0{,}195)=512\ в.$$

5. Находим вспомогательный коэффициент $D$ по формуле (5):

$$D=2+\frac{3{,}65}{100\,A}=2+\frac{3{,}65}{100\cdot 0{,}195}=2{,}187.$$

6. Из табл. 3 (графа 9) определяем ток вторичной обмотки:

$$I_2=\frac{I_0}{2}\cdot D=\frac{170}{2}\cdot 2{,}187=186\ ма=0{,}186\ а.$$

7. Из табл. 3 (графа 10) находим ток первичной обмотки:

$$I_1=1{,}7\,nI_2=1{,}7\cdot\frac{512}{120}\cdot 0{,}186=1{,}35\ а.$$



Кроме анодной обмотки трансформатор имеет следующие обмотки накала:

$U_3=5$ *в*, $I_3=3$ *а* для кенотрона 5U4G;
$U_4=6{,}3$ *в*, $I_4=0{,}9$ *а* для регулирующей лампы 6П3;
$U_5=6{,}3$ *в*, $I_5=0{,}3$ *а* для усилительной лампы 6Г7;
$U_6=6{,}3$ *в*, $I_6=4{,}5$ *а* для ламп приемника и усилителя.

По формуле (6) определяем общий ток первичной обмотки:

$$I_{1\,общ}=I_1+I_3\cdot\frac{U_3}{U_1}+I_4\cdot\frac{U_4}{U_1}=1{,}35+\frac{5}{120}\cdot 3+$$

$$+\frac{6{,}3}{120}\cdot(0{,}9+0{,}3+4{,}5)=1{,}775\ а.$$

8. По формуле (7) находим входную емкость выпрямителя:

$$C_0=\frac{20\,000\,A}{R_ф}=\frac{20\,000\cdot 0{,}195}{380}=10{,}3\ мкф\approx 10\ мкф.$$

Рабочее напряжение конденсатора должно быть не менее 600 *в*; электролитические конденсаторы в данном случае применять можно, соединяя их последовательно и шунтируя каждый сопротивлением $1\div 2$ *мгом* (2 шт. по 20 *мкф*, 450 *в* каждый). Задаваясь пульсацией на выходе фильтра $u\%=1\%$, находим по формуле (11):

$$L_1C_1=\frac{100}{p^2u\%}=\frac{100}{2^2\cdot 1}=25\ гн\cdot мкф.$$

9. Емкость выходного конденсатора по формуле (14) должна быть не менее

$$C_{1\,мин}=15\,000\,\frac{I_0}{pU}=15\,000\cdot\frac{0{,}17}{2\cdot 500}=2{,}55\ мкф.$$

10. Если принять $C_1=C_0=10$ *мкф*, то необходимая индуктивность дросселя будет равна:

$$L_1=\frac{L_1C_1}{C_1}=\frac{25}{10}=2{,}5\ гн.$$

11. Находим габаритную мощность трансформатора с учетом всех обмоток накала (табл. 5):

$$P_{габ}=1{,}7U_2I_2+U_3I_3+U_4I_4+U_5I_5+U_6I_6=$$
$$=1{,}7\cdot 512\cdot 0{,}186+5\cdot 3+6{,}3\cdot 0{,}9+$$
$$+6{,}3\cdot 0{,}3+6{,}3\cdot 4{,}5=213\ ва.$$

12. По формуле (17) определяем:

$$Q_cQ_0=1{,}6\,P_{габ}=1{,}6\cdot 213=340\ см^4,$$

полагая при этом, что обмотки трансформатора будут выполнены из эмалированного провода.

13. Выбираем стандартную пластину Ш-32 (см. табл. 6) с окном $32\times 80$ *мм*.

Необходимая толщина пакета

$$c=\frac{Q_c\,Q_0}{a\cdot b\cdot h}=\frac{340}{3{,}2\cdot 3{,}2\cdot 8}=4{,}2\ см.$$

Сечение сердечника

$$Q_c=3{,}2\cdot 4{,}2=13{,}5\ см^2.$$

14. Число витков первичной обмотки определяем по формуле (18):

$$w_1=50\frac{U_1}{Q_c}=50\cdot\frac{120}{13{,}5}=446\ \text{витков}.$$

15. Число витков остальных (вторичных) обмоток определяем с помощью формулы (19):

$w_2=56\frac{U_2}{U_1}=56\cdot\frac{512}{13{,}5}=2\,140$ витков (одна половина вторичной обмотки).

Всего витков вторичной обмотки $2\,140\times 2$;

$$w_3=56\cdot\frac{5}{13{,}5}=21\ \text{виток};$$

$$w_4=w_5=w_6=56\cdot\frac{6{,}3}{13{,}5}=26\ \text{витков}.$$



16. Определяем диаметры проводов без изоляции по формуле (20) и округляем полученные величины до стандартных:

$$d_1=0{,}7\sqrt{I_1}=0{,}7\sqrt{1{,}775}=0{,}93\ мм;$$
$$d_2=0{,}7\sqrt{I_2}=0{,}7\sqrt{0{,}186}=0{,}3\ (0{,}31\ мм);$$
$$d_3=0{,}7\sqrt{I_3}=0{,}7\sqrt{3}=1{,}22\ (1{,}2\ мм);$$
$$d_4=0{,}7\sqrt{I_4}=0{,}7\sqrt{0{,}9}=0{,}665\ (0{,}69\ мм);$$
$$d_5=0{,}7\sqrt{I_5}=0{,}7\sqrt{0{,}3}=0{,}384\ (0{,}38\ мм);$$
$$d_6=0{,}7\sqrt{I_6}=0{,}7\sqrt{4{,}5}=1{,}49\ (1{,}45\ мм).$$

17. Для расчета дросселя фильтра определяем значение $LI_0^2$:

$$LI_0^2=2{,}5\cdot 0{,}17^2=0{,}0725$$

и по графику фиг. 27 находим $Q_cl_c$:

$$Q_c\,l_c=44\ см^3.$$

18. Выбираем стандартную пластину Ш-16 (см. табл. 6) с окном $16\times 24$ *мм*.

Необходимая толщина пакета сердечника

$$c=\frac{Q_c\,l_c}{a\cdot l_c}=\frac{44}{1{,}6\cdot 10{,}5}=2{,}6\ см.$$

Сечение сердечника

$$Q_c=1{,}6\cdot 2{,}6=4{,}15\ см^2.$$

19. Для определения длины наивыгоднейшего воздушного зазора дросселя вычисляем величину $M$:

$$M=\frac{LI_0^2}{Q_c\,l_c}=\frac{0{,}0725}{44}\ 0{,}00165$$

и по графику фиг. 28 находим значение $l_z\%$:

$$l_z\%=0{,}5.$$

Полная длина воздушного зазора [формула (21)] равна:

$$l_з=\frac{l_з\%\,l_c}{100}=\frac{0{,}5\cdot 10{,}5}{100}=0{,}052\ см\approx 0{,}5\ мм.$$

Прокладка, образующая зазор, должна иметь толщину 0,25 *мм*.

20. Из кривой $\mu_z$ (фиг. 28) находим, что магнитная проницаемость $\mu_z$ равна 108.

21. Число витков дросселя определяем по формуле (22):

$$w = 10^4 \cdot \sqrt{\frac{U_c}{1{,}26\mu_z Q_c}} = 10^4 \cdot \sqrt{\frac{2{,}5 \cdot 10{,}5}{1{,}26 \cdot 108 \cdot 4{,}15}} = 2\,160 \text{ витков.}$$

22. Диаметр провода дросселя находим по формуле (23):

$$d = (0{,}65 \div 0{,}8)\sqrt{I_0} = 0{,}65\sqrt{0{,}17} = 0{,}27 \text{ мм (ПЭ или ПЭЛ).}$$

23. Найдем коэффициент заполнения окна по формуле (24):

$$k_м = \frac{0{,}8\, wd^2}{100\, Q_0} = \frac{0{,}8 \cdot 2\,160 \cdot 0{,}27^2}{100 \cdot 1{,}6 \cdot 2{,}4} = 0{,}33.$$

Так как полученная величина (0,33) меньше 0,4, то можно утверждать, что обмотка дросселя из провода диаметром 0,27 *мм* ПЭ (или ПЭЛ) уместится в окне выбранного сердечника.

24. Для определения сопротивления дросселя найдем среднюю длину витка обмотки (фиг. 25):

$$l_м = 2(a + c) + \pi b = 2(1{,}6 + 2{,}6) + 3{,}14 \cdot 1{,}6 = 13{,}4 \text{ см.}$$

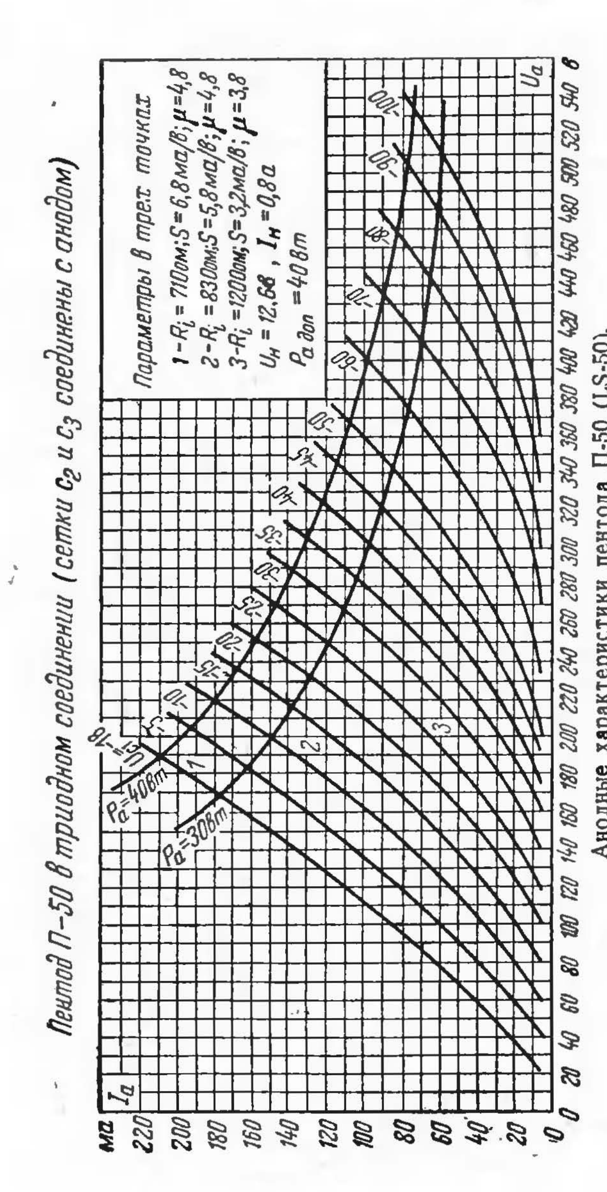
По формуле (25) находим сопротивления дросселя:

$$r_{др} = \frac{225\, w l_м}{d^2 \cdot 10^6} = \frac{225 \cdot 2\,160 \cdot 13{,}4}{0{,}27^2 \cdot 10^6} = 89 \text{ ом.}$$

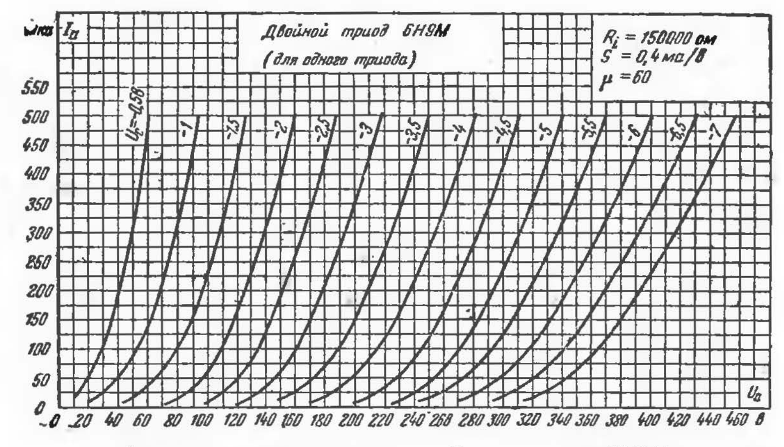
25. Уточняем падение напряжения на дросселе:

$$U_{др} = I_0 r_{др} = 0{,}17 \cdot 89 = 15 \text{ в.}$$

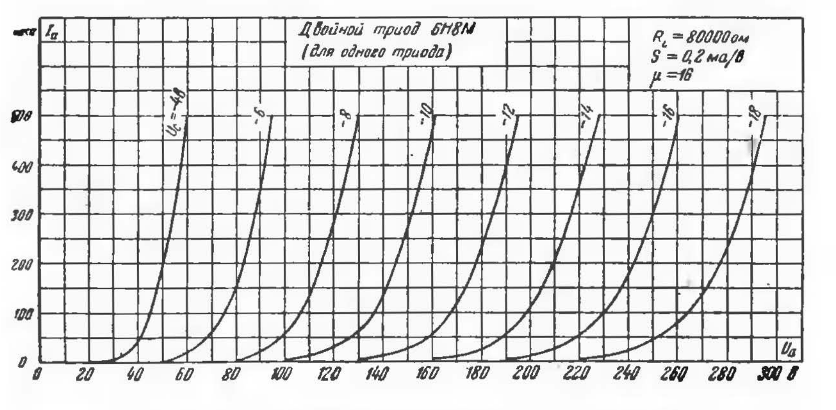
Падение напряжения на дросселе оказалось несколько меньше, чем предполагалось в начале расчета стабилизатора. Такое отклонение является несущественным и перерасчета схемы не требует.




Анодные характеристики пентода П-50 (LS-50).




**Анодные характеристики двойного триода 6Н9М.**




Анодные характеристики двойного триода 6Н8М

Цена 3 р. 55 к.